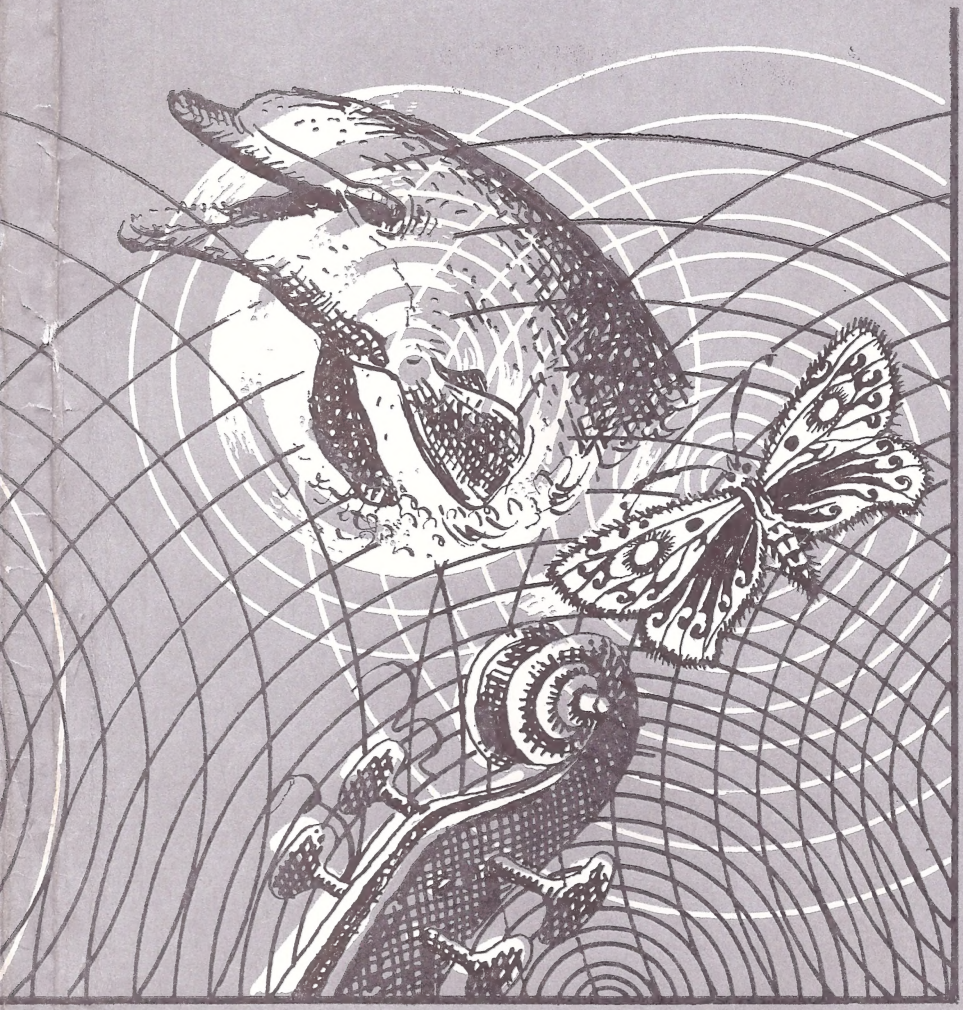
НАУКА
И ПРОГРЕСС

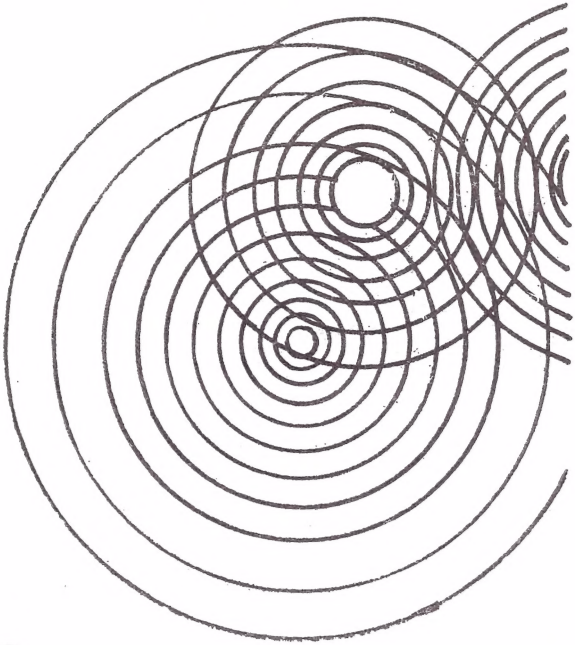
И. Г. ХОРБЕНКО

ЗВУК УЛЬТРАЗВУК ИНФРАЗВУК



И.Г. ХОРБЕНКО

ЗВУК УЛЬТРАЗВУК ИНФРАЗВУК



НАУКА
И ПРОГРЕСС

Издательство
"Знание"
Москва
1986

ББК 22.32
Х79

Иван Григорьевич ХОРБЕНКО родился в 1926 году. Окончил Высшее военно-морское училище радиоэлектроники им. А. С. Попова. Автор научно-технических книг «Ультразвуковая обработка материалов», «Ультразвук в машиностроении» и «Ультразвук в военном деле», а также научно-популярных книг об ультразвуке и его технологическом применении.

Рецензент: Абрамов О. В.— доктор технических наук.

Хорбенко И. Г.

Х79 Звук, ультразвук, инфразвук. Изд. 2-е, перераб. и доп.— М.: Знание, 1986.— 192 с.

40 к. 85 000 экз.

Научно-популярная книга о природе звуковых колебаний различной длины, о самых современных ультразвуковых методах и приборах, применяемых в различных областях науки и производства — от медицинской диагностики до изготовления красок.

Для широкого круга читателей.

Х $\frac{1704030000-007}{073(02)-86}$ 20—86

ББК 22.32
534

© Издательство «Знание», 1986 г.

ОТ АВТОРА

Что такое звук? Учебник ответит сухо и строго: звук — это упругие волны, распространяющиеся в газах, жидкостях и твердых телах и воспринимаемые ухом человека и животных.

А помните, как у Гоголя в «Старосветских помещиках»? «Но самое замечательное в доме — были поющие двери. Как только наступало утро, пение дверей раздавалось по всему дому. Я не могу сказать, отчего они пели: перержавевшие ли петли были тому виною или сам механик, делавший их, скрыл в них какой-нибудь секрет,— но замечательно то, что каждая дверь имела свой особенный голос: дверь, ведущая в спальню, пела самым тоненьким дискантом; дверь в столовую хрипела басом, но та, которая была в сенях, издавала какой-то странный дребезжащий и вместе стонущий звук, так что, вслушиваясь в него, очень ясно наконец слышалось: «батюшки, я зябну!»...»

Мы живем в мире звуков. Мы их слышим всюду — в поле, в лесу, дома и вне его. Звуки для нас — источник разного рода информации, которая в целом ряде случаев воспринимается нами субъективно — пример тому процитированный выше отрывок из повести Гоголя. Благодаря звуку наши мысли обретают плоть, и мы получаем возможность общаться друг с другом.

Вряд ли можно усмотреть преувеличение в утверждении, что мир звуков столь же разнообразен, как и мир красок — цвета.

Но все это слышимые звуки. А есть звуки, которые не воспринимаются человеческим ухом, мы их не слышим. Отсюда их название — «неслышимые звуки». Название не столько научное, сколько бытовое, потому что в науке весь ряд неслышимых звуков имеет свою классификацию: гиперзвук, ультразвук и инфразвук.

Наиболее хорошо изучен и потому нашел более широкое практическое применение ультразвук. Гиперзвук стал объектом изучения и практического использования сравнительно недавно в связи с развитием таких отраслей науки и техники, как физика твердого тела, электроника, радиоэлектроника и т. д. Мало еще изучен

инфразвук, и область, где он уже чему-то служит, пока еще очень ограниченная.

В развитии науки о неслышимых звуках видная роль принадлежит отечественным ученым. Открытые в самом начале XX века неслышимые звуки сразу привлекли к себе внимание исследователей, работающих в самых различных областях науки и техники. Наша страна является родиной практического использования ультразвуков. Впервые их применил в своих исследованиях великий русский физик Петр Николаевич Лебедев. С тех пор наши соотечественники идут в первых рядах исследователей неслышимых звуков, открывая все новые возможности их применения на практике.

Физическая сущность слышимых и неслышимых звуков одна и та же. Почему же именно ультразвуковой диапазон привлек внимание ученых самых различных специальностей? Дело в том, что ультразвуки имеют некоторые особенности по сравнению со звуками слышимого диапазона. В ультразвуковом диапазоне сравнительно легко получить направленное излучение; он хорошо поддается фокусировке, в результате чего повышается интенсивность ультразвукового поля на определенном участке. Распространение ультразвука в газах, жидкостях и твердых телах сопровождается новыми интереснейшими явлениями, многие из которых нашли практическое применение в различных областях науки и техники.

Ультразвук приобрел теперь множество профессий. Ультразвук строит и разрушает, режет и сверлит, штампует и паяет, очищает, сортирует, стерилизует, разведывает. Он помогает текстильщикам шлифтовать основы и красить ткани, пищевикам экономить жиры, высокоэффективными способами осветлять виноградный сок, намного ускорять созревание духов, рыбакам обнаруживать косяки рыб, военным морякам — подводные лодки, медикам выявлять злокачественные опухоли, машиностроителям определять в деталях скрытые дефекты. Его взяли на вооружение геологоразведчики и нефтяники. Довольны и химики, получая с помощью ультразвука тонкие краски и различные эмульсии. Применение ультразвука в металлургии привело к разработке принципиально новой технологии. Благодаря ультразвуку стало возможным синтезирование дисперсных сплавов и создание анти-

фрикционных материалов, значительно интенсифицировался процесс обогащения руды. Ультразвуковые устройства нашли применение в радиоэлектронике и при исследовании состава и свойств вещества. И это еще не весь перечень, его можно продолжить.

Все большую роль ультразвук начинает играть в научных исследованиях. Успешно проведены теоретические и экспериментальные исследования в области ультразвуковой кавитации и акустических течений, позволившие разработать новые технологические процессы. Формируется новое направление в химии — ультразвуковая химия, то есть химия, использующая ультразвук для ускорения химико-технологических процессов. Научные исследования в области физики способствовали зарождению нового раздела акустики — молекулярной акустики, изучающей молекулярное взаимодействие звуковых волн с веществом. Возникли новые области применения ультразвука: интроскопия, голография, квантовая акустика, ультразвуковая фазометрия, акустоэлектроника и др.

Одновременно с теоретическими и экспериментальными исследованиями выполнено много практических работ. Разработаны и внедрены в производство универсальные и специальные ультразвуковые приборы, станки, агрегаты, установки. Созданы и уже применяются ультразвуковые автоматы; включенные в поточные линии, они позволяют значительно повысить производительность труда, эффективность производства и улучшить качество продукции.

Книга познакомит читателей с направлениями научных и теоретических поисков в этой очень перспективной и важной отрасли знаний, а также с некоторыми областями практического применения ультразвука. В первых разделах книги приводятся элементарные сведения о физической сущности звука. В последующих разделах рассказывается об особенностях ультразвуковых эффектов, которые используются или могут быть использованы в научных исследованиях и различных отраслях промышленности, направленных на повышение эффективности производственных процессов и улучшение качества изделий.

В конце книги помещен список литературы, которая поможет читателям более подробно ознакомиться с

современными достижениями науки и техники в области практического использования ультразвука по различным проблемам и направлениям.

* * *

Автор выражает сердечную благодарность доктору технических наук О. В. Абрамову, а также И. А. Антоновой и Н. А. Мисиюк за помощь при подготовке книги к переизданию.

ЗВУК

МНОГО ВЕКОВ НАЗАД

Звуки всегда служили людям средством связи и общения друг с другом, средством познания мира и овладения тайнами природы. Они по-разному воздействуют на человека: радуют и раздражают, успокаивают и придают силы, ласкают слух и пугают своей неожиданностью.

В глубокой древности звук казался людям удивительным, таинственным порождением сверхъестественной силы. Они верили, что звуки могут укрощать диких животных, сдвигать скалы и горы, преграждать путь воде, вызывать дождь, творить другие чудеса.

Большое место в жизни древних людей занимали определенным образом организованные звуки — то, что позднее получило название музыки. Древнеегипетские жрецы, заметив удивительное воздействие музыки на человека, считали, что в ней заключена магическая сила, и старались использовать ее в своих целях. Они воздействовали на воображение и психику людей, подчиняя их своей воле. Умело подобранная музыка, ритмичные звуки барабанов, гонгов, мелодичный перезвон колоколов порождали религиозный экстаз и умиление. Ни один праздник не обходился без ритуальных (обрядовых) песнопений под аккомпанемент систра. В католических костелах играет орган, поет хор, православные церкви также не обходятся без пения. Колокольный перезвон был привычным явлением на Руси.

Отнюдь не случайно музыка стала обязательным элементом, скорее, даже формой религиозных обрядов, богослужений и в христианской церкви, ибо музыка — мощное средство воздействия на чувства верующих.

Историки считают, что нотная грамота, то есть способ записывать музыкальную информацию для хранения, воспроизведения и передачи,— это изобретение народов, населявших в древние времена Индию. Она имела те же семь нот, что и сейчас, но названия у них были другие: са, ре, га, ма, па, дха, ни.

В соответствии с тогдашним мировоззрением и мировосприятием людей каждая из этих нот отражала определенное состояние души: са и ма — спокойствие, умиротворение, га и дха — торжественность, ре — гнев, па — радость, ни — печаль.

Современная теория музыки свободна, конечно, от такого мистического толкования отдельных звуков, однако ее, как и прежде, интересуют законы гармонии, сила и «каналы» воздействия музыкальных образов на психику людей, место и роль музыки в художественном познании и освоении мира.

Одними из первых у человека появились струнные музыкальные инструменты. Вероятно, прообразом их стал лук, точнее, стягивающая его тетива. Постепенно из века в век инструменты совершенствовались и видоизменялись, так возникли, по-видимому, арфы, скрипки, гитары и другие смычковые и щипковые музыкальные инструменты.

Первобытные племена Африки, Центральной Америки и Полинезии применяли особые барабаны для передачи известий. Условный сигнал, услышанный в одном месте, повторяется в другом, третьем, и в короткое время обширная область уведомляется о каком-либо важном событии. Во время первой войны Италии с Абиссинией (ныне Эфиопия) все передвижения итальянских войск становились известными негусу Менелику, что приводило в недоумение итальянское командование, не подозревавшее о существовании у противника барабанного телеграфа. В начале второй войны Италии с Абиссинией подобным же образом был «опубликован» изданный в Аддис-Абебе приказ о всеобщей мобилизации, который стал известен через несколько часов в самых отдаленных провинциях. То же самое наблюдалось и во время англо-бурской войны: благодаря «телеграфу» кафров все военные известия с необыкновенной быстротой распространялись среди обитателей Каплэнда, на несколько суток опережая официальные донесения через курьеров.

По свидетельству путешественника Лео Фробениуса, система звуковых сигналов разработана у некоторых африканских племен так хорошо, что их можно считать обладателями телеграфа, более совершенного, чем оптический телеграф европейцев, предшествовавший электрическому. Археолог Британского музея Р. Гасельден находился в городе Ибадан, расположенном в глубине Нигерии, вдали от морского побережья. Постоянный глухой барабанный бой непрерывно гудел днем и ночью. Утром ученый услышал, что жители о чем-то оживленно переговариваются. Из рассказов он узнал, что большой корабль белых людей потонул, много их погибло. Ученый

не придал этому слуху значения. Однако через три дня он получил телеграмму о гибели «Лузитании». Благодаря барабанному телеграфу эту печальную весть узнало все население от Каира до Ибадана. Это было тем более удивительно, что племена, передавшие друг другу это сообщение, говорят на совершенно разных наречиях, а некоторые из них в это время воевали между собой.

Попытки понять и изучить звук предпринимались еще до нашей эры. Греческий ученый и философ Пифагор, живший две с половиной тысячи лет назад, ставил различные опыты со звуками, так называемые акустические опыты. Он первым доказал, что низкие тона в музыкальных инструментах присущи длинным струнам. При укорочении струны вдвое звук ее повысится на целую октаву. Открытие Пифагора положило начало науке акустике (и теории музыки заодно).

Гармонические соотношения звуков, выявленные Пифагором и его учениками, легли в основу более поздних представлений о так называемой гармонии Вселенной. Согласно этим представлениям небесные тела и планеты расположены относительно друг друга в соответствии с музыкальными интервалами и излучают «музыку сфер». Считалось, например, что Сатурн издает самые низкие звуки, звуки Юпитера можно сравнить с басом, Меркурия — с фальцетом, Марса — с тенором, Земли — с контральто, Венеры — с сопрано. У этой теории была долгая жизнь. Ее признавали даже в эпоху Возрождения, когда уже были получены вполне научные сведения о движении планет. Так, например, отголоски этой теории можно обнаружить в трудах великого Кеплера, открывшего закон движения планет и сыгравшего огромную роль в развитии астрономии и физики.

Первые звуковые приборы были созданы в театрах Древней Греции и Рима для усиления звука. Известно также применение звуковых приборов в египетских храмах, где были установлены «шепчущие» статуи богов. На египетских памятниках мы встречаем изображения музыкантов, играющих на флейтах и арфах.

В одном из итальянских кафедральных соборов с круглым залом диаметром 50 метров можно переговариваться со своим собеседником буквально шепотом, находясь при этом в противоположных концах зала. Изучавшие этот храм ученые объясняют это явление так: в помещениях с радиусом закругления 25 метров условия

распространения звука наиболее благоприятны, так как звуковые волны претерпевают многократное отражение и, накладываясь друг на друга, усиливаются. Образно говоря, звук как бы «стелется» вдоль закругленной стены, достигая собеседника без заметного затухания.

В некоторых музеях хранятся вазы античной работы, основное назначение которых — не художественное украшение жилищ, а отражение, усиление и сосредоточение звука. Делали их из алебастра и устанавливали в больших залах, театрах, собраниях и даже на площадях. Ораторам не надо было напрягать голос: благодаря вазам слушатели воспринимали речь довольно четко на значительном расстоянии. В XVIII веке строители с той же целью стали применять специальные звукопроводы в виде труб, изготовленных из цемента. В частности, подобные звукопроводы можно найти в сооружениях, возведенных по проектам Растрелли. Так, собор Смоленского монастыря весь в звукопроводах. Предполагается, что они есть и в залах Зимнего дворца.

Исторические документы свидетельствуют, будто сиракузский тиран Дионисий мог слышать даже легкий шепот, произнесенный кем-либо во дворце. Если это правда, то, стало быть, в его дворце были хитроумные звукоусиливающие устройства, подобные, вероятно, тем, о которых мы только что говорили.

Немало ценных предложений по архитектурной акустике высказал римский архитектор Витрувий в своем научном труде «Десять книг об архитектуре». Интересные сведения о звуке дошли до нас из поэмы Лукреция «О природе вещей», где он писал: «... Та же часть голосов, что до самых ушей не доходит, попусту мимо идет и, рассеявшись в воздухе, гибнет, часть же другая, в пути отскочивши от твердых предметов, звук отдает и порою морочит подобием слова».

Свойство звука отражаться от препятствий древние архитекторы использовали в своих сооружениях, а в некоторых случаях старались избавиться от него. В английском замке Вудсток эхо отчетливо повторяется 17 раз, Это значит, что время задержки прохождения звука с учетом многократных отражений настолько большое, что можно произнести 17 слогов, прежде чем эхо первого слога вернется обратно. А в итальянском замке близ Милана громко сказанное слово повторяется эхом

30 раз! Это объясняется своеобразной конфигурацией стен замка и их малой звукопоглощаемостью.

Наверное, каждый в своей жизни встречал помещения, которые кажутся очень гулкими. В таких помещениях, как правило, трудно разговаривать, потому что слова становятся неразборчивыми. Природа подобной гулкости — в многократных отражениях звука, в реверберации, то есть наслоении одного эхо на другое. В целом ряде случаев гулкость — явление нежелательное, и с ним издавна борются.

На Руси еще в X—XII веках проводилась специальная («акустическая») обработка внутренних стен церквей и храмов. При постройке Софийского собора в Киеве для снижения гулкости на низких частотах применялись особые звукопоглощающие конструкции — голосники — глиняные сосуды, встроенные в стены. Эти сосуды обладали высокой звукопоглощающей способностью, поэтому звук, пройдя через горловину, быстро затухал, благодаря чему уменьшалось общее отражение от стен и улучшалась разборчивость речи. При возведении театра в Останкинском дворце (XVIII век) крепостные архитекторы Иван и Павел Аргуновы применили резонирующие деки под оркестром и под авансценой, а над зрительным залом установили особые короба, создававшие наилучшие условия для звучания голосов и музыки.

Для каждого из нас источники звука могут быть привычные, известные, но могут быть и необычные, экзотичные. Именно к разряду экзотичных источников звука относятся так называемые «поющие пески». Иногда при смещении поверхностного слоя сухого песка в естественных условиях возникает звучание низкой тональности, напоминающее завывание со скрипом, с частотой примерно 100 герц. Долгое время это явление не имело объяснения. Как выяснилось, звук возникает вследствие образования под поверхностным слоем песка более жесткой песчаной структуры, состоящей из чередующихся гребней и впадин с приблизительно плоским фронтом. Эти гребни и впадины напоминают песчаные «волны», которые образуются под влиянием ветра на свободной поверхности песка в естественных условиях. Верхний слой песка, перемещаясь вдоль нижней волнистой структуры, и порождает звук. При загребании такого песка рукой человек отчетливо воспринимает пальцами вибрацию верхнего песчаного слоя, перемещающегося по неровностям

жесткой «подложки». Часть поверхностного слоя песка обтекает ее гребни и впадины. Поэтому вблизи подложки песок будет совершать движение в условиях повышенного трения, что должно сопровождаться переходом механической энергии в тепловую. Некоторая доля теряемой энергии переходит при этом в звуковую.

В природе существуют так называемые вихревые звуки: свист ветра в проводах, такелаже кораблей, ветвях деревьев, завывание в трубах, на гребнях скал, в расщелинах и узких оврагах. Люди издавна пользовались ими — на охоте, в быту. В Древнем Китае существовал обычай выпускать голубей с привязанными к их хвостам маленькими бамбуковыми палочками. Воздушный поток, проходящий через трубочку, вызывал нежное посвистывание. Подобные звуки издает и тростниковая дудочка, которая была прообразом зародившейся в Древнем Египте флейты. Позже ее стали называть флейтой Пана — в честь древнегреческого бога лесов.

Одна из легенд гласит, что в Иерусалиме когда-то находилась «стозвучная» двурогая труба. Во время жертвоприношений разжигали костер, теплый воздух от которого устремлялся в трубу, заставляя ее выть. Мощные воющие звуки возникали также, когда в нее врывались вихри от пламени пожаров при осаде города. Еще один пример. В 1831 году в Пятигорске была построена беседка, названная «Эоловой арфой». Внутри нее находились две арфы, которые с помощью флюгера разворачивались против ветра и под воздействием воздушного потока издавали гармонические звуки.

Люди с незапамятных времен занимались изучением звуков, или, как мы теперь говорим, акустики. К концу XIX века акустика многим ученым казалась вполне законченным зданием. Но затем выяснилось, что это не совсем так. Особенно это касается ультра-, инфра- и гиперзвука, их физических свойств и практического применения.

ЧТО ТАКОЕ ЗВУК?

Итак, звук — это распространяющиеся в упругих средах — газах, жидкостях и твердых телах — механические колебания.

Но здесь, как нам кажется, требуется сделать одно уточнение. Издавна повелось называть звуком только то, что мы слышим. Стало быть, у слова «звук» есть два основных значения. В одном случае оно является термином, обозначающим физическое явление, и это явление существует в природе независимо от нас; в другом случае этим словом мы называем, в сущности, наше восприятие физического явления — то, что мы слышим, на что так или иначе реагируем. Именно поэтому, как уже было сказано, и появилось деление звуков на слышимые и неслышимые, деление, надо сказать, не совсем строгое уже хотя бы потому, что мы воспринимаем звуки по-разному — по громкости, по тону, по высоте и «окраске» звука — тембру. Отсюда ясно, что наше субъективное восприятие не может служить объективной основой для оценки физических параметров звука.

Рассмотрим, что же такое звук с объективной точки зрения. Вот, например, заработал радиоприемник. Диффузор динамика передает свои колебания окружающим частицам воздуха. В момент колебания диффузора подстегнутые толчком сместились мельчайшие частицы воздуха — молекулы. Но далеко молекулы не уходят. Резко подавшись вперед, они смешиваются с молекулами слоев воздуха, расположенных перед ними, и «поджимают» их. Поэтому в соседних слоях воздуха на ничтожное мгновение окажется гораздо больше молекул, чем было раньше. Следовательно, давление на них на мгновение возрастет, воздух станет плотнее. При движении диффузора в обратном направлении смещение молекул приводит к тому, что в слое, расположенном рядом со сжатым, на мгновение окажется недостаток молекул. В результате рядом со слоем сгущенным, слоем повышенного давления, возникает слой разреженный, с пониженным давлением.

Пока работает радиоприемник, слои сгущений и разряжений, то есть упругие колебания среды (в данном случае воздуха), будут распространяться все дальше и дальше. Попадая в человеческое ухо, чередующиеся сжатия и разрежения вызывают ощущение звука. Таким образом, то, что мы называем звуком, представляет собою быструю последовательную смену чередующихся сжатий и разрежений воздуха. При этом частицы воздуха не перемещаются с распространяющимся звуком. Подталкиваемые сжатым воздухом, они только колеблются,

попеременно смещаясь вперед и назад на очень небольшие расстояния. Изолированных колебаний одного тела не существует. В каждой среде в результате взаимодействия между частицами колебания передаются все новым и новым частицам, в то время как сама среда в целом остается неподвижной, а в ней распространяются звуковые волны.

Проще уяснить понятие о звуковых волнах можно, если вместо реального источника звука рассмотреть источник в виде периодически раздувающегося и сокращающегося шарика. Шарик, расширяясь, сжимает непосредственно прилегающий к нему слой среды, который, в свою очередь, передает это сжатие следующему слою. Такое сжатие проходит через всю среду. В следующий момент шарик сокращается, и примыкающие к нему сжатые частички среды получают возможность отдаляться друг от друга. Расширение тоже проходит через все пространство.

С физической точки зрения звук — это чередующиеся сжатия и разрежения среды, распространяющиеся во все стороны.

Наглядный пример — волны на поверхности воды. Если бросить камень в воду, вначале появится углубление, затем возвышение, а потом возникают волны, представляющие собой последовательно чередующиеся гребни и впадины. Увеличиваясь по фронту, они распространяются по всем направлениям, но отдельные частицы не передвигаются вместе с волнами, а колеблются только в небольших пределах около некоторого неизменного положения. В этом можно убедиться, например, наблюдая за пробкой, подпрыгивающей на волнах. Она будет подниматься и опускаться, то есть колебаться, пропуская под собой бегущую волну *. На поверхности воды за гребнем волны следует впадина, а в воздухе, в котором распространяется звук, сгущение молекул сменяется разрежением. И в том и в другом случае отдельные частицы вещества совершают колебательные движения. Благодаря сходству в движении частиц воздуха и воды чередующиеся сжатия и разрежения в воздухе называют звуковыми волнами.

---

* В действительности пробка тоже будет передвигаться по направлению волны. Это значит, что какая-то часть энергии волны тратится на перемещение частиц среды вдоль распространения волн.

При достижении звуковой волной какой-либо точки пространства частицы вещества, до того не совершавшие упорядоченных движений, начинают колебаться. Любое движущееся тело, в том числе и колеблющееся, способно совершать работу, то есть оно обладает энергией. Следовательно, распространение звуковой волны сопровождается распространением энергии.

Чтобы наглядно показать, в чем суть колебательного движения, прибегают обычно к маятнику. Сделаем то же самое и мы.

Если маятник (или груз, подвешенный на нитке) отклонить от положения равновесия, а затем отпустить, то он будет совершать свободные колебания. Под действием силы тяжести маятник возвращается в свое первоначальное положение, по инерции проходит исходную точку и поднимается вверх, при этом сила тяжести будет тормозить его движение. В точке максимального отклонения маятник на мгновение остановится и начнет движение в обратном направлении. Циклы колебаний маятника непрерывно повторяются, и мы являемся свидетелями колебательного движения.

Органы слуха человека способны воспринимать звуки с частотой от 15—20 колебаний в секунду до 16—20 тысяч *. Соответственно этому механические колебания с указанными частотами называются звуковыми, или акустическими.

Вопросы, которыми занимается акустика, очень разнообразны. Некоторые из них связаны со свойствами и особенностями органов слуха.

Общая акустика изучает вопросы возникновения, распространения и поглощения звука.

Физическая акустика занимается изучением самих звуковых колебаний, а за последние десятилетия охватила и колебания, лежащие за пределами слышимости (ультраакустика). При этом она широко использует разнообразные методы превращения механических колебаний в электрические и обратно. Применительно к звуковым колебаниям в число задач физической акустики входит и изучение физических явлений, обусловливающих те или иные качества звука, различаемые на слух.

---

* О частоте и других физических характеристиках колебательных движений нам предстоит еще поговорить.— *Авт.*

Электроакустика занимается получением, передачей, приемом и записью звуков при помощи электрических приборов.

Архитектурная акустика изучает распространение звука в помещениях, влияние на звук размеров и формы помещений, свойств материалов, покрывающих стены и потолки, и т. д.

Музыкальная акустика исследует природу музыкальных звуков, а также музыкальные строи и системы. Мы различаем, например, музыкальные звуки (пение, свист, звон, звучание струн) и шумы (треск, стук, скрип, шипение, гром). Музыкальные звуки более просты, чем шумы. Комбинация музыкальных звуков может вызвать ощущение шума, но никакая комбинация шумов не даст музыкального звука.

Гидроакустика занимается изучением явлений, происходящих в водной среде, связанных с излучением, приемом и распространением акустических волн. Она включает вопросы разработки и создания акустических приборов, предназначенных для использования в водной среде.

Атмосферная акустика изучает звуковые процессы в атмосфере, в частности распространение звуковых волн, условия сверхдальнего распространения звука.

Физиологическая акустика исследует возможности органов слуха, их устройство и действие. Она изучает образование звуков органами речи и восприятие звуков органами слуха. В последние годы в связи с развитием кибернетики перед физиологической акустикой встала очень сложная, но крайне важная проблема анализа и синтеза звуковой речи человека. Создание систем, способных анализировать человеческую речь,— важный этап на пути проектирования машин, в особенности роботов-манипуляторов и электронных вычислительных машин, послушных устным распоряжениям операторов. Аппарат для синтеза речи может дать большой экономический эффект. Если по междугородным телефонным каналам передавать не сами речевые сигналы, а коды, полученные в результате их анализа, а на выходе линий синтезировать речь, по тому же каналу можно передавать в несколько раз больше информации. Правда, абонент не услышит настоящего голоса собеседника, но слова-то будут те же, что были сказаны в микрофон. Конечно, это не совсем подходит для семейных разговоров, но удобно для

деловых бесед, а именно они-то и перегружают каналы связи.

Биологическая акустика рассматривает вопросы звукового и ультразвукового общения животных и изучает механизм локации, которым они пользуются, исследует также проблемы шумов, вибрации и борьбы с ними за оздоровление окружающей среды.

ЗВУК И СЛУХ

Совокупность слышимых и неслышимых звуков напоминает в принципе спектр солнечных лучей, в котором есть видимая область — от красного до фиолетового цвета и две невидимые — инфракрасная и ультрафиолетовая. Именно по аналогии с солнечным спектром получили название звуки, не воспринимаемые человеческим ухом: инфразвук, ультразвук и гиперзвук.

Восприятие звуков людьми очень индивидуально. Каждый слышит, так сказать, по-своему. Дети, например, слышат звуки более высоких частот, чем пожилые люди.

Как уже упоминалось, звук следует рассматривать с объективной и субъективной точек зрения. Звук как субъективное явление более сложен и менее изучен, чем его объективная физическая сущность.

Как мы воспринимаем звук?

Наружное ухо состоит из ушной раковины и слухового прохода, соединяющего ее с барабанной перепонкой. Основная функция наружного уха — определение направления на источник звука. Слуховой проход, представляющий сужающуюся внутрь трубку длиной два сантиметра, предохраняет внутренние части уха и играет роль резонатора. Слуховой проход заканчивается барабанной перепонкой — мембраной, которая колеблется под действием звуковых волн. Именно здесь, на внешней границе среднего уха, и происходит преобразование объективного звука в субъективный, то есть звуковой волны в субъективное ее ощущение.

Непосредственно за барабанной перепонкой расположены три маленькие соединенные между собой косточки: молоточек, наковальня и стремя, с помощью которых колебания передаются внутреннему уху. Там, в слуховом нерве, они преобразуются в биоэлектрические сигналы.

Малая полость, где находятся молоточек, наковальня и стремя, наполнена воздухом и соединена с полостью рта евстахиевой трубой. Благодаря последней поддерживается одинаковое давление на внутреннюю и внешнюю стороны барабанной перепонки. Обычно евстахиева труба закрыта, а открывается лишь при внезапном изменении давления (при зевании или глотании) для выравнивания его. Если у человека евстахиева труба блокирована, например, из-за простудного заболевания, то давление не выравнивается, и человек ощущает боль в ушах.

При передаче колебаний от барабанной перепонки к овальному окну, которое является началом внутреннего уха, энергия первоначального звука как бы концентрируется в среднем ухе. Это осуществляется двумя способами, в основе которых лежат хорошо известные принципы механики. Во-первых, уменьшается амплитуда, но одновременно увеличивается мощность колебаний. Здесь можно провести аналогию с рычагом, когда для поддержания равновесия к большому плечу прикладывается меньшая сила, а к меньшему — большая. С какой точностью осуществляется такое превращение в человеческом ухе, видно из того, что амплитуда колебаний барабанной перепонки равна диаметру атома водорода (10^{-8} сантиметра), а молоточек, наковальня и стремя уменьшают ее в три раза. Во-вторых, и это более существенно, концентрация звука обусловливается разностью диаметров барабанной перепонки и овального окна внутреннего уха.

Сила, действующая на барабанную перепонку, равна произведению давления на площадь барабанной перепонки. Эта сила через молоточек, наковальню и стремя воздействует на овальное окно, с противоположной стороны которого находится жидкость. Площадь овального окна в 15—30 раз меньше площади барабанной перепонки, поэтому и давление на него в 15—30 раз больше. Кроме того (как уже было сказано, молоточек, наковальня и стремя увеличивают мощность колебаний в три раза), благодаря среднему уху давление на овальное окно превышает почти в 90 раз первоначальное давление, действующее на барабанную перепонку. Это очень важно, поскольку дальше звуковые волны распространяются уже в жидкости. Не будь увеличения давления, звуковые волны вследствие эффекта отражения не смогли бы проникнуть в жидкость.

Молоточек, наковальня и стремя имеют крошечные мышцы, которые обеспечивают защиту внутреннего уха от повреждений при воздействии сильных шумов. Внезапные очень интенсивные звуки могут разрушить этот защитный механизм и вызвать серьезные повреждения уха.

Слуховой аппарат человека — необычайно сложный механизм. Особенно в той части, которая начинается с так называемого овального окна — порога внутреннего уха. Звуковые волны здесь уже распространяются в жидкости (перилимфе), которой наполнена улитка. Этот орган внутреннего уха, действительно напоминающий улитку, имеет длину три сантиметра и по всей длине разделен перегородкой на две части. Звуковые волны, попавшие на овальное окно улитки, доходят до перегородки, огибают ее и далее распространяются почти к тому же самому месту, где они впервые коснулись перегородки, но уже с другой стороны.

Перегородка улитки, по сути дела, состоит из основной мембраны, очень тонкой и тугой вблизи овального окна, но становящейся толстой и вялой ближе к «хвосту» улитки. Звуковые колебания создают на поверхности основной мембраны волнообразную рябь, при этом гребни для каждой данной частоты лежат в совершенно определенных участках мембраны. Высокочастотные звуки создают максимум колебаний на том участке основной мембраны, где она наиболее натянута, то есть вблизи овального окна, низкочастотные же звуки — на хвостовую часть улитки, где основная мембрана толстая и вялая. Этот механизм позволяет объяснить, как человек выделяет тоны различной частоты.

Механические колебания преобразуются в электрические в специальном органе (органе Корти), размещенном над верхней частью основной мембраны и представляющем собой набор из 23,5 тысячи «мясистых» ячеек, расположенных вдоль длины органа четырьмя рядами. Над органом Корти находится похожая на заслонку текториальная мембрана. Оба эти органа погружены в эндолимфу и отделены от остальной части улитки мембраной Рейснера. Волоски, растущие из ячеек органа Корти, почти пронизывают поверхность текториальной мембраны. Основная мембрана, на которой находится орган Корти вместе со своими волосистыми ячейками, как бы шарнирно подвешена на текториальной мембране. При

деформации основной мембраны между ними возникают касательные напряжения, которые изгибают волоски, соединяющие две мембраны. Благодаря такому изгибу и происходит окончательное преобразование звука — теперь он уже закодирован в виде электрических сигналов. Изгибы волосков играют в некотором роде роль пусковых механизмов для электрохимических реакций в ячейках. Они и являются источниками электрических сигналов.

Что происходит далее со звуком и какую форму он приобретает, пока еще остается до конца неразгаданной тайной. Известно только, что теперь звук закодирован всплесками электрической активности, так как каждая волосистая ячейка выделяет электрический импульс. Природа этого кода тоже пока неизвестна. Расшифровка его усложняется тем, что волосистые ячейки излучают электрические импульсы даже тогда, когда никакого звука нет. Только разгадав этот код, можно будет понять истинную природу субъективного звука, понять, как мы слышим то, что слышим.

Основные физические характеристики любого колебательного движения — период и амплитуда колебания, а применительно к звуку — частота и интенсивность колебаний.

Периодом колебания называется время, в течение которого совершается одно полное колебание, когда, например, качающийся маятник из крайнего левого положения переместится в крайнее правое и вернется в исходное положение.

Частота колебаний — это число полных колебаний (периодов) за одну секунду. Эту величину в Международной системе единиц называют герц (Гц). Частота — одна из основных характеристик, по которой мы различаем звуки. Чем больше частота колебаний, тем более высокий звук мы слышим, то есть звук имеет более высокий тон.

Нам, людям, доступны звуки, ограниченные следующими частотными пределами: не ниже 15—20 герц и не выше 16—20 тысяч герц. Ниже этого предела находится инфразвук (меньше 15 герц), а выше — ультразвук и гиперзвук, то есть $1{,}5 \cdot 10^4 - 10^9$ герц и $10^9 - 10^{13}$ герц соответственно.

Ухо человека наиболее чувствительно к звукам с частотой от 2000 до 5000 герц. Наибольшая острота слуха

наблюдается в возрасте 15—20 лет. Затем слух ухудшается. У человека до 40 лет наибольшая чувствительность находится в области 3000 герц, от 40 до 60 лет — 2000 герц, а старше 60 лет — 1000 герц. В пределах до 500 герц человек различает повышение или понижение частоты всего лишь на один герц. На более высоких частотах люди менее восприимчивы к такому незначительному изменению частоты. Так, например, при частоте более 2000 герц человеческое ухо способно отличить один звук от другого только тогда, когда разница в частоте будет не меньше 5 герц. При меньшей разнице звуки будут восприниматься как одинаковые. Однако правил без исключений не бывает. Есть люди, обладающие необычайно тонким слухом. Например, одаренный музыкант может отреагировать на изменение даже на какую-то долю одного колебания.

С периодом и частотой связано понятие о длине волны. Длиной звуковой волны называется расстояние между двумя последовательными сгущениями или разрежениями среды. На примере волн, распространяющихся на поверхности воды,— это расстояние между двумя гребнями (или впадинами).

Звуки могут отличаться один от другого и по тембру. Это значит, что одинаковые звуки по высоте тона могут звучать по-разному, потому что основной тон звука сопровождается, как правило, второстепенными тонами, которые всегда выше по частоте. Они придают основному звуку дополнительную окраску и называются обертонами. Иными словами, тембр — качественная характеристика звука. Чем больше обертонов накладывается на основной тон, тем «сочнее» звук в музыкальном отношении. Если основной звук сопровождается близкими ему по высоте обертонами, то сам звук будет мягким, «бархатным». Когда же обертоны значительно выше основного тона, появляется «металличность» в звуке или голосе.

Органы слуха благодаря своему замечательному устройству легко отличают особенности одного колебания от другого, голос близкого или знакомого человека от голосов других людей. По тому, как говорит человек, мы судим о его настроении, состоянии, переживаниях. Радость, боль, гнев, испуг, страх перед опасностью — все это можно услышать, даже не видя того, кому принадлежит голос.

Вторая основная характеристика — амплитуда коле-

баний. Это наибольшее отклонение от положений равновесия при гармонических колебаниях. На примере с маятником амплитуда — максимальное отклонение его от положения равновесия в крайнее правое или левое положение. Амплитуда колебаний, так же как и частота, определяет интенсивность (силу) звука. При распространении звуковых волн отдельные частицы упругой среды последовательно смещаются. Это смещение передается от частицы к частице с некоторым запозданием, величина которого зависит от инерционных свойств среды. Передача смещений от частицы к частице сопровождается изменением расстояния между этими частицами, в результате чего происходит изменение давления в каждой точке среды.

Акустическая волна несет в направлении своего движения определенную энергию. Благодаря этому мы слышим звук, создаваемый источником, находящимся на определенном расстоянии от нас. Чем больше акустической энергии достигает уха человека, тем громче слышится звук. Сила звука, или ее интенсивность, определяется количеством акустической энергии, протекающей за одну секунду через площадку в один квадратный сантиметр. Следовательно, интенсивность акустических волн зависит от величины акустического давления, создаваемого источником звука в среде, которое, в свою очередь, определяется величиной смещения частиц среды, вызываемого источником. В воде, например, даже очень небольшие смещения создают большую интенсивность звуковых волн.

Интенсивность обычных, воспринимаемых человеческим ухом звуков очень мала. Громкому разговору, к примеру, соответствует интенсивность звука, равная приблизительно одной миллиардной доле ватта на квадратный сантиметр. Но так как площадь двух слуховых каналов ушей человека приблизительно равна одному квадратному сантиметру, то мощность в одну миллиардную долю ватта человек воспринимает как достаточно громкий звук. Если бы мы захотели вскипятить чайник с водой, используя энергию звуковой речи, превращенную в тепло без всяких потерь, то для этого потребовалась бы энергия непрерывного громкого разговора всех жителей Москвы в течение суток, в то время как на газовой плите такой чайник закипает в течение 10 минут. А мощность, которая получилась бы при одновременном

крике всех людей земного шара, была бы в два раза меньше мощности двигателя автомобиля «Жигули».

С интенсивностью звука связана громкость. Чем больше интенсивность звука, тем он громче. Однако понятия о громкости и интенсивности не равнозначны. Громкость звука — это мера силы слухового ощущения, вызываемого звуком. Звук одинаковой интенсивности может создавать у различных людей неодинаковые по своей громкости слуховые восприятия. Так, например, звуки, одинаковые по интенсивности, но различающиеся по высоте, воспринимаются ухом с разной громкостью в зависимости от особенностей слуховых восприятий. Мы не воспринимаем как очень слабые, так и очень громкие звуки. Каждый человек обладает так называемым порогом слышимости, который определяется наименьшей интенсивностью звука, необходимой для того, чтобы звук был услышан.

Наиболее хорошо воспринимаемые звуки по частоте лучше различаются и по громкости. При частоте 32 герца по громкости различаются три звука, при частоте 125 герц — 94 звука, а при частоте 1000 герц — 374. Увеличение это не беспредельно. Начиная с частоты 8000 герц, число различимых звуков по громкости уменьшается. При частоте 16 000 герц человек может различать только 16 звуков.

Звуки очень большой интенсивности человек перестает слышать и воспринимает их как ощущение давления или боли. Такую силу звука называют порогом болевого ощущения. Исследования показали, что интенсивность, при которой звуки разной частоты вызывают болевое ощущение, различна. Если силу звука увеличить в миллион раз, громкость возрастает только в несколько сотен раз. Выяснилось, что ухо преобразует силу звука в громкость по сложному логарифмическому закону, ограждая свои внутренние части от чрезмерных воздействий.

Наиболее мощные звуки, с которыми большинству людей приходится сталкиваться в своей повседневной жизни, вызывают либо раздражение, либо даже боль в ушах. Но если мощность звука, обусловливающего болезненное ощущение в ушах, понизить в десять миллионов раз, то и такой звук оказывается достаточно интенсивным, чтобы распространяться в воздухе.

Для измерения нашего субъективного восприятия

звука используется логарифмическая шкала. Когда мощность одного звука в 10 раз больше мощности другого, то говорят, что интенсивность первого звука составляет 10 децибел по отношению ко второму, в 100 раз — 20 децибел, в 1000 раз — 30 децибел и т. д. Иными словами, всякий раз, когда отношение мощностей звука увеличивается в 10 раз, интенсивность звука, выраженная в децибелах, возрастает на 10. При таком подходе мы получаем не абсолютную, а лишь относительную шкалу. Необходимо как-то выделить уровень нулевой интенсивности, чтобы от него производить отсчет. Такой уровень выбран на основе субъективных показателей — это минимальный порог восприятия звука человеческим ухом, который равен 10^{-12} ватта на квадратный метр. Звук в 10 раз более мощный имеет уровень интенсивности 10 децибел, в миллион раз — 60 децибел, в 10 миллион миллионов раз, вызывающий болевое ощущение,— 130 децибел, что соответствует 10 ваттам на квадратный метр.

Имеется еще одна особенность человеческого слуха. Если к звуку определенной громкости добавить звук той же или близкой к ней частоты, то общая громкость окажется меньше математической суммы тех же громкостей. Одновременно звучащие звуки как бы компенсируют или маскируют друг друга. А звуки, далеко отстоящие по частоте, не влияют друг на друга, и их громкость оказывается максимальной. Эту закономерность композиторы используют для достижения наибольшей мощности звучания оркестра.

С точки зрения восприятия органами слуха звуков их можно разделить в основном на три категории: шум, музыка, речь. Такое разделение оправдано не только нашей привычкой к классификации явлений и предметов. Шум, музыка и речь — разные области звуковых событий, обладающие специфической для человека информацией. Потому-то они и изучаются разными специалистами.

Шум — бессистемное сочетание большого количества звуков, когда все эти звуки сливаются в нечто хаотическое, нестройное. Каждый из нас достаточно хорошо знаком с этим не всегда приятным явлением. Даже когда мы, занятые своими мыслями, не замечаем будто бы шума, он оказывает на нас свое воздействие, как правило, отрицательное. Час, другой, и мы чувствуем, что начинает побаливать голова, появляется слабость.

Причем нам иногда кажется, что все это происходит вроде бы беспричинно. Только уж если шум мешает нам основательно, действует на нас раздражающе, мы твердо знаем, что голова заболела от него.

Сейчас специалисты считают борьбу с шумом в городах и особенно на промышленных предприятиях одной из важнейших проблем. Речь идет, конечно, не о том, чтобы всюду стояла абсолютная тишина. Да она просто и не достижима в условиях современного города и современного производства. Более того, человек не может жить в абсолютной тишине и никогда не стремится к ней. Не случайно безмолвие сурдокамер — одно из нелегких испытаний для тех, кто готовится к космическим полетам. Человек, долго находящийся в абсолютной тишине, испытывает «информационный голод», который может привести к расстройству психики. Словом, длительная абсолютная тишина так же пагубна для психики, как и беспрерывный повышенный шум. Оба эти состояния противоестественны для человека, который за миллионы лет эволюции приспособился к определенному шумовому фону — разнообразным и ненавязчивым звукам природы.

Наблюдения за состоянием здоровья рабочих шумных цехов показали, что под действием шума нарушается динамика центральной нервной системы и функций вегетативной нервной системы. Проще говоря, шум может повышать давление крови, учащать или замедлять пульс, понижать кислотность желудочного сока, кровообращение мозга, ослаблять память, снижать остроту слуха. У рабочих шумных производств отмечается более высокий процент заболеваний нервной и сосудистой систем, желудочно-кишечного тракта.

Одна из причин отрицательного воздействия шумов в том, что, когда мы сосредоточиваемся, чтобы лучше слышать, наш слуховой аппарат работает с большой перегрузкой. Одноразовая перегрузка не страшна, но когда мы перенапрягаемся изо дня в день, из года в год, бесследно это не проходит.

Какое количество и какого именно шума может выдержать человек, зависит от возраста. Молодые, как правило, выдерживают больше шума, чем пожилые, и грохот оркестра или пронзительное пение, которое нравится подростку, может совершенно вывести из себя человека в возрасте.

Как же врачи и специалисты по акустике определяют уровень шума? Для измерения интенсивности звука в слуховом восприятии принята международная шкала громкости, разделенная на 13 бел, или 130 децибел. По этой шкале нулю соответствует порог слышимости, 10 децибел — шепот низкой громкости, 20 децибел — шепот средней громкости, 40 децибел — тихий разговор, 50 децибел — разговор средней громкости, 70 децибел — шум пишущей машинки, 80 децибел — шум работающего двигателя грузового автомобиля, 100 децибел — громкий автомобильный сигнал на расстоянии 5—7 метров, 120 децибел — шум работающего трактора на расстоянии одного метра и, наконец, 130 децибел — порог болевого ощущения, то есть порог выносливости уха. Установлено, что максимальные величины, будто не влияющие на организм, равны 30—35 децибелам, однако при длительном воздействии такого шума у практически здоровых людей может дать «сбой» нервная система, что выражается, как правило, нарушением сна.

Медики настойчиво продолжают исследовать влияние шума на здоровье человека. Они, например, установили, что при повышении шума увеличивается выделение адреналина. Адреналин в свою очередь влияет на работу сердца и, в частности, способствует выделению свободных жирных кислот в кровь. Для этого достаточно человеку кратковременно находиться под воздействием шума интенсивностью 60—70 децибел. Шум более 90 децибел способствует более активному выделению кортизона. А это в определенной степени ослабляет способность печени бороться с вредными для организма веществами, в том числе и с теми, которые способствуют возникновению рака.

Оказалось, что шум вреден также и для зрения человека. К такому выводу пришла группа болгарских врачей, исследовавших эту проблему. Специалисты, участвовавшие в опытах, по нескольку часов находились в затемненных камерах, куда постоянно транслировался записанный на магнитофонную пленку шум от работы станков и механизмов. При этом было установлено, что заметно уменьшается активность сетчатки глаза, от которой зависит работа глазных нервов, а следовательно, и острота зрения. Итак, шум — очень неблагоприятное явление для человека, он заметно снижает производительность умственного и физического труда.

Невозможно перечислить все техногенные источники шума, от которого требуется активная защита. Но если иметь в виду уличный шум современного большого города, то его основной источник установить не столь уж трудно — это транспорт, особенно неумолчно урчащие, а то просто ревущие автомобили. В некоторых крупных городах мира шум в дневное время достигает 120—130 децибел. В Западной Европе есть города, где в течение нескольких лет жители не могут днем работать, а ночью спать — над их домами непрерывно проносятся реактивные самолеты.

Возникает вопрос, можно ли бороться с шумами и как?

В Советском Союзе борьбе с шумом, улучшению акустических условий оказывается повсеместное внимание. Самолетам, как правило, запрещено летать над городами. Шумные предприятия либо изолируют от жилых районов зелеными насаждениями, либо стараются их вывести за городскую черту. В новых районах строят широкие проспекты, где звуки больше поглощаются, не отражаясь многократно от стен домов. В населенных пунктах запрещены звуковые сигналы всех видов транспорта (исключения оговариваются правилами дорожного движения).

Растения — хороший гаситель шума. Деревья и кустарники снижают шум на 5, 10, а иногда и на 20 децибел. Безусловно, что эффективность зеленых насаждений зависит от их планировки и пород деревьев. Эффективны зеленые полосы между тротуаром и мостовой. На широких улицах со значительным движением транспорта рекомендуется создавать рядом с тротуарами аллеи шириной 10—12 метров. Лучше всего гасят шум липы и ели.

Ели поглощают уличный шум в такой степени, что жители домов, находящихся позади такого хвойного заслона, едва ли не полностью избавляются от раздражающих шумов улицы большого города.

Специалисты, работающие в лаборатории строительной акустики Московского научно-исследовательского института типового и экспериментального проектирования /МНИИТЭП/, предложили так называемые шумозащитные окна для жилых помещений. Они обеспечивают снижение шума в квартирах на 44 децибела (обычное окно снижает уличный шум всего примерно на 22 деци-

бела). Окна снабжены клапанами-глушителями, благодаря которым обеспечивается доступ свежего воздуха в помещение без существенного ухудшения противошумовой защиты.

На промышленных предприятиях тоже ведется настойчивая борьба с шумом. Для этого применяются индивидуальные средства защиты — «противошумы» и «антифоны» различной конструкции, снижающие на 30—50 процентов уровень высококачественного шума. Более эффективный путь к уменьшению шума — использование разнообразных средств звукоизоляции, звукопоглощающих покрытий.

Хороший почин в борьбе с шумом сделан на Ермолинском хлопчатобумажном объединении. Наступление на децибелы началось здесь несколько лет назад. Сотрудники Института гигиены труда и профзаболеваний АМН СССР предложили использовать звукопоглощающие подвесные плиты — кулисы. Немало пришлось поработать ученым-гигиенистам вместе с инженерами, чтобы стали максимально эффективными эти акустические ловушки. На первых порах, например, стены облицовывали плоскими плитами. Затем стали их делать волнистыми, что дало еще больший эффект, нашли оптимальный вариант размещения кулис. Результат налицо — уровень шума снижен более чем вдвое, производительность труда повысилась, а заболеваемость ткачих уменьшилась на 30 процентов. Ермолинский вариант борьбы с шумом взят на вооружение московским шелковым комбинатом имени Розы Люксембург «Красная Роза», столичной ткацкой фабрикой «Красные текстильщики», Раменским текстильным комбинатом и др.

Еще один путь борьбы с шумом — это замена физически изношенной и морально устаревшей техники более совершенной. Можно также применить хорошо организованный и высококачественный ремонт и модернизацию промышленного оборудования и другие меры.

Можно быть уверенным, что проблема борьбы с промышленными шумами будет в конце концов решена, ибо этого требуют социальные и экономические интересы общества.

Нормативно-технической основой комплексного решения этой проблемы является стандартизация, целенаправленная и планомерная деятельность, призванная строго регламентировать все факторы, так или иначе

порождающие шум, и установить методы и способы защиты от него. Именно этим занимаются специалисты стран — членов Совета Экономической Взаимопомощи, они разрабатывают стандарты тишины на производстве и в быту. При этом обязательно учитывается опыт, накопленный в той или иной стране, в той или иной отрасли народного хозяйства. Каждый стандарт СЭВ представляет собой синтез опыта и современных научных достижений и целиком ориентирован на использование прогрессивной техники и технологии.

Венгерские специалисты разработали стандарт «Допустимые уровни звукового давления в жилых и общественных зданиях». Этот документ устанавливает ряд акустических пределов, благодаря которым понятие тишины обретает количественное выражение. Так, например, тишина в квартире, по мнению медиков, участвовавших в разработке стандарта,— это 40 децибел днем и 30 децибел ночью. Для сравнения: 25 децибел дает шелест листвы на умеренном ветру, 30 децибел — тикание часов на расстоянии 1 метра, 75—80 децибел — шум на улице небольшого города.

Ведется работа над стандартом, который установит предельно допустимый уровень шума в районе жилищных застроек, местах отдыха и детских игр. Нормы, заложенные в этот стандарт, будут обязательны для проектировщиков и строителей.

Разумеется, чтобы эффективно бороться с шумом, надо уметь его измерять. Но не только, нужны еще единые методы измерения и оценки. Именно это предполагается обосновать новым стандартом СЭВ на методы измерения шумов, создаваемых транспортными потоками на улицах больших городов.

При СЭВ есть постоянная комиссия с рабочей группой по охране труда, она координирует работу по стандартизации, ведущуюся в странах СЭВ. В 1976 году были утверждены технические нормы, ограничивающие шум на предприятиях текстильной промышленности, где, как известно, работают преимущественно женщины.

Средства и методы защиты от шума классифицирует стандарт, разработанный советскими специалистами. А стандарт, содержащий общие требования к методам измерения шума, создали специалисты ЧССР. Специалисты ГДР обосновали стандарт СЭВ «Допустимые уровни шума на рабочих местах», согласно которому уровень

шума отныне не должен превышать 85 децибел. Конечно, это еще далеко не идеальные условия, о которых мечтают гигиенисты, тем не менее и снижение производственного шума до этого уровня на всех без исключения предприятиях привело бы к значительному оздоровлению условий труда.

Работа по стандартизации, имеющей целью борьбу с шумом, продолжается. Так, постоянная комиссия СЭВ возложила на специалистов СССР разработку проекта долгосрочной программы, направленной на всестороннюю защиту человека от вредного воздействия шума.

При слове «музыка» мы тотчас представляем себе вид искусства, специфически — с помощью звуковых художественных образов — отражающего действительность и столь же специфически воздействующего на людей — на их психику и эмоции.

К тому, что музыка — это многообразный мир особым образом организованных звуков, благодаря чему она способна выражать с достаточной полнотой эмоциональные переживания людей, их душевное состояние, мы давно привыкли. При этом как-то забывается, что к ней применимы все те характеристики, которые установлены и измерены физиками при изучении звуков вообще. Приложимы, однако, с учетом ее особенностей, потому-то она является объектом изучения не акустики вообще, а музыкальной акустики — науки, родившейся на стыке акустики, музыковедения, психологии и физиологии. Ведь музыкальный язык — это, можно сказать, очеловеченный звук и по своему происхождению, и по своему назначению.

Но еще с большим правом то же самое мы можем сказать о звуках, из которых складывается наш язык, неразрывно связанный, с мышлением, сознанием.

Таким образом, шум, музыка, звуковая речь — это как бы ступени лестницы, ведущей ко все большей и большей организованности, упорядоченности в мире звуков, ко все большей их информативности.

РАСПРОСТРАНЕНИЕ ЗВУКА

Распространение звука подчиняется основным законам, общим для акустических волн любого диапазона, обобщенно называемых обычно звуковыми волнами.

К основным законам распространения относятся законы отражения и преломления звука на границах различных сред, а также дифракции звука и рассеяния звука при наличии препятствий и неоднородностей в среде и неровностей на границах раздела сред. На распространение звука оказывает влияние поглощение звука, то есть необратимого перехода энергии звуковой волны в другие виды энергии, в частности в тепло. Все перечисленные факторы влияют на дальность распространения звука. Важным фактором является также направленность излучения и скорость распространения звука, которая зависит от среды и ее специфического состояния.

Известно, что световые лучи образуют тени непрозрачных предметов, находящихся на их пути, звуки же не образуют таких теней, когда размеры препятствий не очень велики. Звуковые волны как бы обходят препятствия. Поэтому на концерте мы хорошо слышим все без исключения, инструменты, несмотря на то что многие из них мы не видим, так как они закрыты другими музыкантами.

Чем же объяснить, что звуку и свету, имеющим волновую природу, присущи такие, казалось бы, прямо противоположные свойства?

Характер распространения звуковых волн у препятствия существенно зависит от соотношения между размерами препятствия и длиной волны. Если размеры препятствия малы по сравнению с длиной волны или соизмеримы с ней, то волны обтекают это препятствие, не давая тени. Следовательно, волны, пройдя через отверстие, размеры которого малы по сравнению с длиной волны, распространяются или как бы растекаются во все стороны. Если же препятствие велико по сравнению с длиной волны, то растекание не происходит и за препятствием образуется тень. Слышимые звуки имеют длину волны в пределах нескольких десятков сантиметров (один-два метра). Поэтому окружающие нас предметы, размеры которых не превышают одного-двух метров, не являются препятствием для звуковых волн, так как они их обтекают, не создавая звуковой тени. Длина же световых волн измеряется десятитысячными долями миллиметра, потому-то за всеми предметами макромира образуются тени.

Как уже упоминалось, звуковые волны могут распространяться в воздухе, газах, жидкостях и твердых

телах. В безвоздушном пространстве звуковые волны не возникают и соответственно не распространяются.

Скорость распространения колебательных движений от частицы к частице зависит от среды. Леонардо да Винчи еще в XV веке писал: «Если ты, будучи на море, опустишь в воду отверстие трубы, а другой конец ее приложишь к уху, то услышишь шум кораблей, очень удаленных от тебя».

Кстати говоря, о том, что звук в различной среде распространяется с различной скоростью, было известно людям с давних пор. Охотники, пастухи, воины, приложившись ухом к земле, получали, как бы мы сказали сейчас, информацию о движении копытных животных или конницы.

Первые измерения скорости распространения звука в воздухе были проведены в XVII веке Миланской академией наук. На одном из холмов установили пушку, а на другом расположился наблюдательный пункт. В момент выстрела на наблюдательном пункте по вспышке засекли время. Когда услышали звук, тоже засекли время. Зная расстояние между наблюдательным пунктом и пушкой и время прохождения сигнала, легко вычислили скорость распространения звука. Она оказалась равной 330 метрам в секунду.

Скорость распространения звука в воде впервые была измерена в 1827 году на Женевском озере. Две лодки находились одна от другой на расстоянии 13 847 метров. На первой лодке под днищем подвесили колокол, а со второй опустили в воду простейший гидрофон-приемник. На первой лодке одновременно с ударом в колокол подожгли порох, на второй наблюдатель в момент вспышки запустил секундомер и стал ждать прихода звукового сигнала. Выяснилось, что в воде звук распространяется в четыре с лишним раза быстрее, чем в воздухе, то есть со скоростью 1450 метров в секунду.

Чем выше упругость среды, тем больше скорость: в каучуке — 50, в воздухе — 340, в воде — 1500, а в стали — 5800 метров в секунду (цифры приблизительные). Если бы мы, находясь в Москве, могли крикнуть так громко, чтобы звук долетел до Ленинграда, то нас услышали бы там только через полчаса, а если бы звук на это же расстояние распространялся в стали, то он был бы принят через две минуты. Этот пример из числа гипотетических. А вот вполне реальный. Человек, сидящий

в концертном зале Московской консерватории в последнем ряду, слышит звуки музыки на 0,02—0,03 секунды позже, чем житель Дальнего Востока, слушающий этот же концерт дома у радиоприемника. И все потому, что скорость распространения радиоволн в эфире равна 300 тысячам километров в секунду.

На скорость распространения звука оказывают влияние состояния одной и той же среды. Когда мы говорим, что в воде звук распространяется со скоростью 1500 метров в секунду, это вовсе не означает, что в любой воде и при любых условиях. С повышением температуры и солености, а также с увеличением глубины, а следовательно, и гидростатического давления скорость звука возрастает. Или возьмем сталь. Здесь тоже скорость звука зависит как от температуры, так и от качественного состава стали: чем больше в ней углерода, то есть чем она тверже, тем и быстрее распространяется в ней звуковая волна.

Звуковые волны, проникая из одной среды в другую, отклоняются от своего первоначального направления, то есть преломляются. Угол преломления может быть больше или меньше угла падения. Это зависит от того, из какой среды в какую проникает звук. Если скорость звука во второй среде больше, чем в первой, то угол преломления будет больше угла падения, и наоборот.

Встречая на своем пути препятствие, звуковые волны отражаются от него по строго определенному правилу — угол отражения равен углу падения. Если акустические сопротивления двух сред значительно отличаются друг от друга, большая часть энергии падающей волны переходит в энергию отраженной волны, а меньшая часть энергии проникает через поверхность раздела. Чем больше разница акустических сопротивлений двух сред, тем больше разница энергий отраженной и преломленной волн. Так, например, акустическое сопротивление воды почти в пять тысяч раз больше акустического сопротивления воздуха, поэтому звук практически из воды в воздух, и наоборот, не проникает, а только отражается в виде эха. Кому приходилось нырять в воду, тот хорошо знает, что под водой почти не слышно разноголосого шума, царящего на пляже, но зато хорошо прослушиваются звуки от источников, находящихся в воде.

Когда звук отражается от нескольких поверхностей, находящихся на разных расстояниях, возникает много-

кратное эхо. Причем если время между отдельными отражениями меньше десятой доли секунды, вместо отдельных эхо появится непрерывное длительное звучание, называемое реверберацией. Явление реверберации возможно даже в среде, которая на первый взгляд представляется однородной, — скажем, в море, где на пузырьках воздуха, твердых частицах, ряби на поверхности и т. д. может происходить рассеяние акустических волн.

При распространении звуковых волн может возникать явление интерференции (сложение) звука. Оно возникает, если в упругой среде имеются два или несколько источников акустических волн, излучающих колебания одинаковой частоты или колебания, частоты которых относятся как целые числа. При интерференции звука происходит усиление или ослабление колебаний. Если в некоторую точку среды придут два колебания одинаковой частоты, амплитуды и фазы, то отклонения частиц среды в этой точке от положения равновесия увеличатся в два раза. Если же в некоторую точку придут два колебания одинаковой частоты, но противоположные по фазе, то колебания взаимно уничтожатся и отклонения частиц среды в этой точке от положения равновесия не будет совсем. И наконец, если в некоторую точку среды придут два колебания одинаковой частоты, сдвинутые по фазе на произвольную величину, то частицы среды будут отклоняться от положения равновесия на некоторую результирующую величину.

Звук распространяется в виде расходящейся сферической волны, которая заполняет все больший объем, так как колебания частиц, вызванные источником звука, передаются все большей массе среды. С увеличением расстояния колебания частиц среды ослабевают. Для сферической волны энергия излучения расходуется на приведение в колебательное движение частиц среды, расположенных на сферической поверхности. Чем дальше волна уходит от источника, то есть чем шире становится среда, тем больше частиц среды вступает во взаимодействие и тем меньше энергии приходится на их долю — волна затухает. Амплитуда колебаний частиц среды уменьшается и соответственно уменьшается звуковое давление. Сферическая волновая поверхность увеличивается пропорционально квадрату радиуса, следовательно, интенсивность сферической волны убывает обратно пропорционально квадрату расстояния. Таким образом, основной

причиной уменьшения интенсивности, и звукового давления является расширение фронта волны.

Как же избежать затухания волны и увеличить дальность передачи звукового сигнала? Для этого необходимо звук сконцентрировать в заданном направлении. Когда мы хотим, чтобы нас лучше было слышно, мы прикладываем ладони ко рту или пользуемся рупором. В этом случае звук будет ослабляться меньше, а звуковые волны распространяться дальше. Ослабление звука связано и с тем, что звуковая волна постепенно теряет энергию из-за поглощения ее средой. Степень поглощения опять-таки определяется свойствами среды. В более вязкой среде — в вате, каучуке и т. д.— поглощение наибольшее. Однако оно во многом зависит и от частоты звука. Чем выше частота, тем поглощение больше. Звук частотой 10 000 герц поглощается в 100 раз сильнее, чем звук частотой 1000 герц.

Пояснить это можно следующим примером. Орудийный выстрел вблизи кажется нам оглушающе резким, издали — более мягким, глухим. Дело в том, что звук, от выстрела пушки содержит в себе как низкие, так и высокие частоты, а звуки высоких частот поглощаются в воздухе сильнее, чем звуки низких частот. Находясь далеко от стреляющей пушки, мы слышим звуки более низких частот, а звуки высоких не доходят до нас. Еще более наглядный пример, подтверждающий это явление,— звучание удаляющегося оркестра. Сначала пропадают высокие звуки флейт и кларнетов, затем средние — корнетов и альтов, и, наконец, когда оркестр будет уже совсем далеко, слышен только большой барабан.

Большое влияние на дальность распространения звука оказывает дифракция, то есть искривление звуковых лучей. Чем разнороднее среда, тем больше искривляется звуковой луч и соответственно тем меньше дальность распространения звука. Звуковые поля, создаваемые дифракцией исходной волны на препятствиях, помещенных в среду, на неоднородностях самой среды, а также на неровностях и неоднородностях границ среды, называются рассеянными полями. И наоборот, рассеяние звука — это возникновение дополнительных звуковых полей в результате дифракции звука на препятствиях, находящихся в среде, на неоднородностях среды, а также на неровных и неоднородных границах среды. Следовательно, дифрак-

ция звука и рассеяние звука — явления взаимосвязанные.

Поскольку вода является упругой средой, звуки в ней распространяются довольно хорошо. В зависимости от мощности источника звука дальность распространения звука в море равна десяткам или сотням километров. Но бывают случаи, когда звук распространяется на расстояние до нескольких тысяч километров по так называемому подводному звуковому каналу, который возникает чаще всего в океане. Это область глубин, где скорость звука вначале уменьшается, а достигнув минимума, начинает возрастать. Физически это обусловливается большой зависимостью скорости распространения звука в морской воде от ее температуры, солености и гидростатического давления.

С глубиной скорость звука уменьшается, но лишь до тех пор, пока понижается температура воды. Достигнув определенного уровня, скорость начинает возрастать из-за повышения гидростатического давления. Верхние и нижние границы звукового канала имеют глубину с равными скоростями звука. Слой воды, в котором скорость минимальна, является центральной зоной звукового канала, то есть его осью. Сверхдальнее прохождение звука в канале объясняется тем, что звуковые лучи почти полностью отражаются от верхней и нижней границ звукового канала, не выходят за его пределы, а концентрируются и распространяются вдоль оси звукового канала. «Чтобы лучше понять это,— говорит академик Л. М. Бреховских,— вспомните, как ведет себя уставший путник. Он предпочитает держаться теневой, более прохладной стороны, нести на своих плечах как можно меньше груза и двигаться с минимальной скоростью. Ведь только при этом он сможет пройти максимальное расстояние. Звуковой луч в морской воде подобен этому путнику. Выйдя из источника, он уходит вверх от оси звукового канала. Чем выше, тем теплее, и луч заворачивает вниз, «в холодок», и углубляется до тех пор, пока не начинает «ощущать» тяжесть повышающегося гидростатического давления».

Концентрируясь в канале, звуковые волны способны распространяться на сверхдальние расстояния с очень незначительным затуханием. Свойство сверхдальнего распространения звука в море находит практическое применение на флоте и в авиации. Американские ученые

проделали в Атлантическом океане эксперимент, подтверждающий влияние среды на дальность распространения звука. На глубине 500 метров были взорваны заряды тринитротолуола массой полтора килограмма каждый. Спустя некоторое время взрыв был зафиксирован на удалении от места эксперимента 4500 километров. Такой взрыв в воздухе слышен всего на расстоянии четырех километров, а в лесу — не более 200 метров. Рекорд распространения звука был зафиксирован американскими специалистами, когда взрыв примерно 20 килограммов тротила, произведенный у Бермудских островов, был прослушан у берегов Австралии. А это ни много ни мало — 22 тысячи километров.

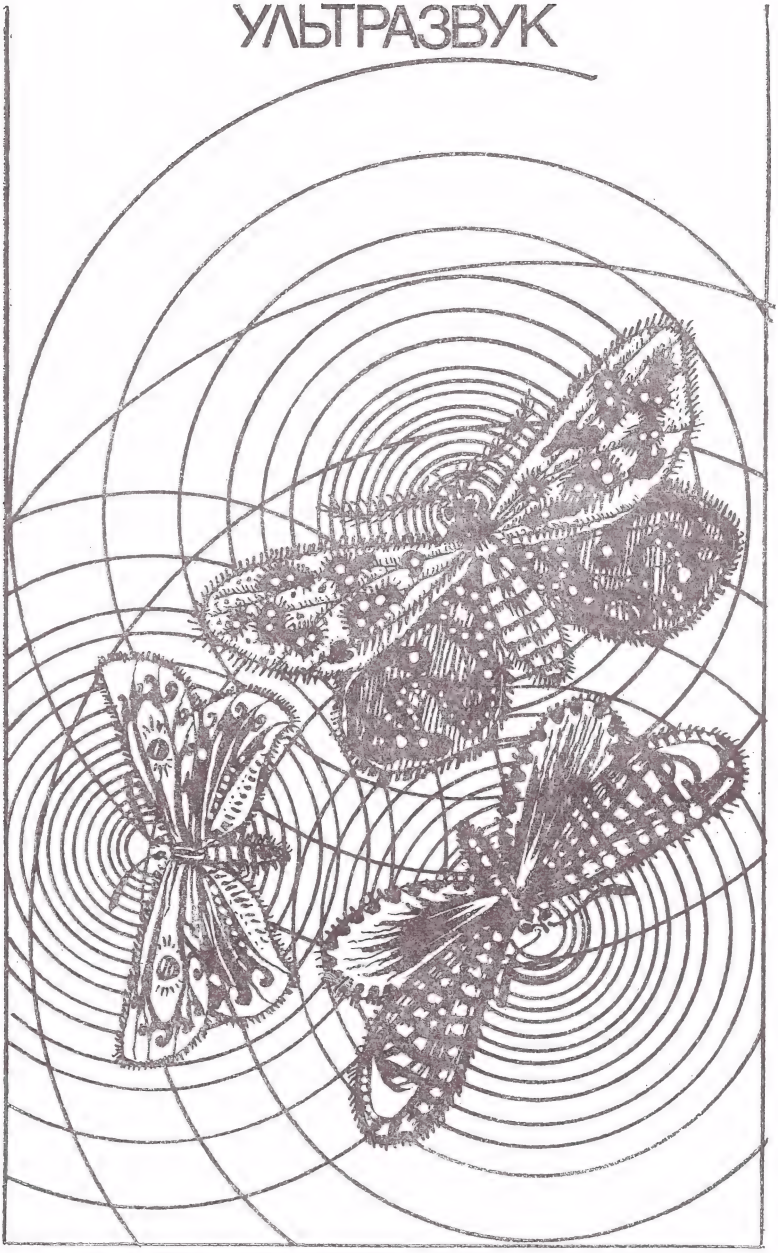
Сверхдальнее распространение звука в подводном звуковом канале американские специалисты использовали для создания спасательной системы «Софар». С кораблей и самолетов, терпящих бедствие, сбрасывают небольшие бомбочки массой от 0,5 до 2,5 килограмма, которые взрываются на глубине залегания оси звукового канала. Береговые гидроакустические посты принимают звуковой сигнал и с высокой точностью определяют место взрыва, а следовательно, и место катастрофы.

В зарубежной (американской) печати как-то сообщалось, что при проведении исследований в области подводной связи были обнаружены волны, распространяющиеся без затухания. Их назвали гидроническими. На распространение этих волн не оказывают никакого влияния концентрация соли в воде, температурные колебания и давление. Приводились в этих сообщениях такие интересные подробности и детали. Скумбрия, весящая менее килограмма, имеющая ничтожно малую мощность своего излучения, может передать сигнал на сотни метров. Причем этот сигнал способен распространяться и в воздухе. Сигналы от передатчика мощностью 0,1 ватта, находившегося на глубине 28 метров, принимались уже в воздухе на специальную антенну. Под водой «гидроническая связь» поддерживалась водолазами на расстоянии до 50 километров.

По утверждению авторов публикаций о гидронических волнах, эти волны распространяются со скоростью, близкой к скорости света, то есть в сотни и тысячи раз быстрее, нежели ультразвуковые.

Что это — реальность или же еще одна сенсация вроде пресловутых НЛО?

УЛЬТРАЗВУК



НЕСЛЫШИМЫЕ ЗВУКИ

Неслышимые звуки... Непривычное сочетание слов — все равно что черный свет или холодный кипяток. Между тем такие звуки действительно существуют в природе, и в них нет ничего необыкновенного. С ними, сами того не замечая, мы встречаемся на каждом шагу. Ультразвуки наряду со слышимыми звуками издают тикающие часы, летящий самолет, телефонный звонок и т. п. А вот пример из истории. В одном из древних китайских храмов до настоящего времени хранится таз с ручками, обладающий удивительным свойством. Стоит налить в него воду и слегка потереть ручки, как вода словно вскипает, хотя остается холодной. Чудо это разгадано. При трении ручек возникают невидимые глазом высокочастотные колебания стенок таза. Они-то и вызывают «кипение» налитой в таз воды. Виновником чуда оказался ультразвук.

Уже отмечалось, что по своей физической природе слышимый звук и ультразвук ничем друг от друга не отличаются. Да, собственно, и нет резкого перехода от слышимого звука к ультразвуку: тут граница колеблется в пределах «от» и «до» и зависит от возможностей слухового аппарата людей. Для одних ультразвук начинается с порога 10 килогерц, для других этот порог поднимается до 20 килогерц. А некоторые люди и на 40—50 килогерц могут реагировать. Правда, на слух они такие звуки воспринимать уже не могут, но замечено, что у них, если они находятся вблизи источника ультразвука, обостряется зрение.

Стало быть, нижний предел, перейдя который звук становится ультразвуком, зависит от порога слышимости людей, а поскольку он не у всех одинаковый, специалистам ничего не оставалось, как согласиться на какие-то «средние» величины. Обычно это 16—20 килогерц.

Несколько по-иному обстоит дело с определением верхней границы ультразвука. Возможности человеческого слуха тут во внимание не принимаются, а отталкиваются от физической природы упругих колебаний, которые могут распространяться в материальной среде при условии, что длина волны должна быть больше длины свободного пробега частиц этой среды (молекул) или больше межатомных расстояний. Длина же волны

находится в обратной зависимости от частоты колебаний. Вот почему ультразвуковые колебания затухают в газах больше, чем в жидкости, и еще больше, чем в твердом теле. Или, говоря по-другому, газы — наименее подходящая для ультразвука среда, чем жидкость, а тем более твердое тело.

На основании исследований знаменитого русского физика П. Н. Лебедева и его учеников можно сделать вывод, что высшая граница ультразвуковых колебаний в материалах с малым поглощением энергии звуковых волн находится в районе 100 миллиардов герц. Ультразвук еще более высоких частот должен поглощаться настолько, что будет полностью затухать уже у самой поверхности излучателя. Ультразвук такой частоты пока еще не получен. Наиболее высокий ультразвук, уже полученный, имеет частоту 25 миллиардов герц. Он может распространяться на очень небольшие расстояния и то только в кристаллах, например, в кристаллах кварца или при очень низких температурах, близких к абсолютному нулю.

В зависимости от длины волны и частоты ультразвук обладает специфическими особенностями излучения, приема, распространения и применения, поэтому область ультразвуковых частот удобно подразделить на три подобласти: низкие ультразвуковые частоты ($1{,}5 \cdot 10^4 - 10^5$ герц), средние ($10^5 - 10^7$ герц) и высокие ($10^7 - 10^9$ герц).

Ультразвуковые волны применяются как в научных исследованиях при изучении строения и свойств вещества, так и для решения самых разнообразных технических задач.

Ультразвук отличается от обычных звуков тем, что обладает значительно более короткими длинами волн, которые легче фокусировать и соответственно получать более узкое и направленное излучение, то есть сосредоточивать всю энергию ультразвука в нужном направлении и концентрировать ее в небольшом объеме. Многие свойства ультразвуковых лучей аналогичны свойствам световых лучей. Но ультразвуковые лучи могут распространяться и в таких средах, которые для световых лучей непрозрачны. Это позволяет использовать ультразвуковые лучи для исследования оптически непрозрачных тел.

Мощность ультразвука в отличие от слышимых звуков может быть достаточно большой. От искусственных источников она может достигать десятков, сотен ватт или даже нескольких киловатт, а интенсивность — десятков и сотен ватт на квадратный сантиметр. Следовательно, с ультразвуком внутрь материальной среды поступает очень большая энергия механических колебаний. Возникает так называемое звуковое давление колебательного характера. Его величина непосредственно связана с интенсивностью звука. Например, для слышимых звуков, соответствующих разговору средней громкости, это давление ничтожно мало, его можно сравнить разве что с таким давлением, которое оказывает мошка, сидящая на листочке, плывущем по воде. При интенсивности ультразвуковой волны от трех до пяти ватт на квадратный сантиметр звуковое давление (в воде) оказывается равным нескольким атмосферам — в несколько миллионов раз превышает давление звуков речи. К тому же не следует забывать, что это давление меняет свой знак, переходя в разрежение, с частотой многих тысяч раз в секунду.

К верхней границе ультразвуковых волн примыкают волны гиперзвукового диапазона (10^9 — 10^{13} герц). Упругие колебания этих частот называют гиперзвуком, или по-другому можно сказать ультра-ультразвуком.

Гиперзвук — это тот же ультразвук. Разница только в том, что благодаря более высоким частотам и, следовательно, меньшим, чем в области ультразвуковых колебаний, длинам волн гиперзвук по-иному взаимодействует со средой. Это взаимодействие осуществляется уже на уровне элементарных частиц. Гиперзвук характеризуется частотами, соответствующими частотам электромагнитных колебаний дециметрового, сантиметрового и миллиметрового диапазонов (это все сверхвысокие частоты, СВЧ). Гиперзвуковой частоте 10^9 герц в воздухе соответствует длина волны $3{,}4 \cdot 10^{-5}$ сантиметра, она одного порядка с длиной свободного пробега молекул в воздухе при этих условиях. А мы уже знаем, что условием распространения высокочастотных упругих колебаний в среде является такое соотношение между длиной волны и длиной свободного пробега, при котором длина волны заметно больше длины пробега (а в жидких и твердых средах — больше межатомных расстояний). Поэтому в газах при нормальном атмосферном давлении гиперзвуковые волны практически не распространяются. В жид-

ких средах распространяются на очень короткие расстояния. Относительно хорошими проводниками гиперзвука являются твердые тела в виде монокристаллов и то при низких температурах.

До того как стало возможным получать гиперзвук искусственным путем, изучение гиперзвуковых волн и их распространение в жидкостях и твердых телах проводилось главным образом оптическим методом, основанным на исследовании рассеяния света на гиперзвуках теплового происхождения. При этом было обнаружено, что рассеяние в оптически прозрачной среде происходит с образованием нескольких спектральных линий, смещенных относительно частоты падающего света на частоту гиперзвука.

Современные методы получения и приема гиперзвука, так же как и ультразвука, основываются на использовании пьезоэлектрического и магнитострикционного эффектов (о них будем говорить дальше). При возбуждении гиперзвука с помощью резонансных электроакустических преобразователей, применяемых в ультразвуковом диапазоне частот, размеры этих преобразователей должны быть очень малы ввиду малости длины волны гиперзвука. Их получают, например, путем вакуумного напыления пленок из пьезоэлектрических материалов на торец звукопровода, имеющего формы кристаллического стержня из сапфира, рубина, кварца и других веществ кристаллического строения.

Уникальные свойства гиперзвука определили и специфическую сферу его применения. «Потребителями» гиперзвука оказались прежде всего физика твердого тела (для исследований состояния вещества), акустоэлектроника и акустооптика.

ЗВУКИ В МИРЕ ЖИВОТНЫХ

В настоящее время развивается, набирает силу молодая область знания — биоакустика, изучающая формы, способы и системы звукового общения в мире животных. И не только общения. Оказывается, многие живые существа в процессе эволюции научились использовать «свой голос» для ориентации в пространстве.

Еще совсем недавно слова «язык животных» ради осторожности брали в кавычки: какой, дескать, у

животных может быть язык — монопольное право на обладание им принадлежит только человеку. Теперь все чаще даже в серьезных научных работах о языке животных пишут без кавычек, потому что вполне достоверно установлено: животные действительно разговаривают между собой, только разговор их сводится к обмену информацией сигнального характера. Он предельно однозначен и конкретен. Специалисты записали и расшифровали десятки звуковых сигналов, имеющих для того или иного вида животных определенное значение. Чаще всего это предупреждение об опасности, выражение угрозы, удовлетворения, победы в борьбе с соперником и т. д.

Развитие биоакустики подогревается не только извечно присущим ученым любопытством, желанием проникнуть в неизведанное и таким образом пополнить копилку знаний об окружающем мире. Оно стимулируется и потребностями практики. Даже, пожалуй, больше ими, нежели чем-либо другим. Знания, добываемые биоакустиками, нужны инженерам, работающим над созданием новых приборов, механизмов, систем, которые могли бы оказаться чрезвычайно полезными во многих отраслях техники и народного хозяйства. Тут и охрана аэродромов от пернатых, которые нередко становятся виновниками бед, тут и защита пашен и полей от вредных насекомых, тут и управление поведением стадных животных. И многое, многое другое.

Мы поговорим не обо всех направлениях биоакустических исследований, а только о тех, которые прямо или косвенно имеют отношение к теме «неслышимые звуки».

Начнем с «мира безмолвия», как до недавнего времени называли мир подводных глубин. Теперь же выяснилось, что он далеко не безмолвный.

В воде звук распространяется почти в 5 раз быстрее, чем в воздухе. Скорость распространения звука в воде в среднем равна 5300 километрам в час. Кроме ракет, ни один аппарат, созданный человеком для движения, не может развивать пока такой скорости. Да и ракеты-то движутся в среде менее плотной, чем вода. Поэтому, если иметь в виду воду, скорость звука остается до сих пор непревзойденной. В воздухе источник мощностью в 100 киловатт слышен на расстоянии до 15 километров, тогда как в воде звук от источника мощностью в один киловатт слышен на расстоянии 30—40 километров. Вода почти так же прозрачна для звука, как воздух для

света. Благодаря этому свойству воды за последние два десятилетия опровергнуто бытовавшее мнение, что морские глубины безмолвны, а поговорка «нем, как рыба» потеряла всякий смысл.

Первое знакомство с подводными шумами произошло во время второй мировой войны. Обнаружили их военные моряки с помощью гидроакустических приборов, презназначенных для обнаружения вражеских кораблей, включая подводные лодки, по шуму, издаваемому винтами. И чем совершеннее становились приборы, тем все чаще они отзывались не только на шум винтов, но и на звуки какой-то иной природы. Какой, пока было неясно. С такими звуками впервые столкнулись американские и японские военные моряки. На американской подводной лодке, проходившей через Макассарский пролив, прямо по курсу гидрофоном был обнаружен сильный шум. Командир подводной лодки предположил, что это шум от новых акустических мин, объявил боевую тревогу и изменил курс. Через некоторое время такая же история произошла с японской подводной лодкой. Как позже выяснилось, командиры этих подводных лодок были напуганы звуками, которые издавали скопления очень шумливых и совершенно безобидных креветок.

Иногда «концерт», задаваемый скоплением рыб, креветок и других морских животных, совершенно заглушает шум винтов даже близко идущего судна. Шум, издаваемый креветками, который привел в смятение командиров подводных лодок, иногда бывает настолько громким, что пугает пешеходов, проходящих в ночное время по песчаным берегам японских островов из одного селения в другое.

После второй мировой войны во многих странах начались разносторонние исследования подводных шумов как в природных уловиях, так и в аквариумах *.

---

* О том, что подводный мир не столь уж безмолвен, знали еще в древности. Вот, например, что писал в свое время Аристотель: «Рыбы также немы, ибо у них нет ни легких, ни дыхательного горла, ни гортани. Однако некоторые из них издают звуки и шумы, о таковых говорят, что у них есть голос... Все они издают кажущиеся голосовые звуки частью трением жабер, на которых есть покрытые шипами места, частью брюшными органами. Ибо некоторые из них содержат воздух, через трение и движение которого производятся звуки». Некоторых рыб греки называли ворчунами, а римляне — воронами.

Каким же образом «разговаривают» рыбы? Кормящаяся стая кильки, например, издает шелест, напоминающий шорох листьев во время ветра. Караси, карпы и сазаны, заглатывая пищу, довольно громко причмокивают. Звук, издаваемый сардинами, немного напоминает шум прибоя. Вьюны, как известно рыболовам, пищат, за что их кое-где называют пищухами. Одной из наиболее «болтливых» морских рыб оказалась тригла, она непрерывно ворчит и квакает. При подъеме трала триглы поднимают прямо-таки скандальный шум. Если посаженную в аквариум триглу погладить рукой, она тихонько заклохчет, если же ее раздразнить, она вырвется и издаст несколько резких звуков.

Замечено, что беспричинно рыбы звуков не издают. Обязательно должен быть повод. Да ведь и наземные животные ведут себя так же.

С приближением корабля рыбы чаще всего затихают.

Некоторые рыбы начинают издавать звуки только после захода солнца.

Когда аквариумных рыб дразнили, толкали, кололи, пугали, они отвечали скрежетом, треском, не похожим ни на что рычанием.

Омары в состоянии испуга и раздражения с громким скрипом трут свои усики о панцирь. Морской краб альфеус, щелкая клешнями, в случае грозящей ему опасности издает звуки немногим более слабее тех, которые мы слышим, когда клепальщик сшивает стальные листы корабельной обшивки. Ворчуны, небольшие рыбки, обитающие в прибрежных водах Северной Америки, издают звуки, будто это работает пневматическая дрель. Источником такого звука у них служит плавательный пузырь. Гигантская луна-рыба, выскакивая на поверхность воды, скрежещет зубами. Рыба-собака едва ли не в буквальном смысле скрипит челюстями. Спинорог, алектис и пинагор тоже скрипят, но чем, пока никто не знает. Про того, кто громко рыдает, нередко говорят: «Ревет, как белуга!» Мало кому ведомо, однако, что поговорка пошла от каспийской белуги — рыбы семейства осетровых, достигающей в длину 9 метров. Рыбаки знают ее громкий, тяжелый вздох, напоминающий рев.

Очень своеобразные звуки издают крупные морские млекопитающие отряда китообразных. Нередко эти звуки напоминают шум гребных винтов проходящих мимо

судов. Китообразные во время войны не раз вводили в заблуждение командиров кораблей.

Итак, морские животные издают множество разнообразных звуков. А могут ли они слышать звуки? Несомненно. Именно поэтому рыбак, сидящий с удочкой где-нибудь в укромном уголке водоема, стремится соблюдать по возможности тишину. Шум отпугивает некоторых животных, живущих постоянно в воде, других, наоборот, привлекает, вызывает у них что-то вроде любопытства. Островитяне южной части Тихого океана приманивают дельфинов мягким похлопыванием ладоней по воде. Жители Новой Гвинеи, охотясь на акул, привлекают их звуками трещотки, сделанной из раковин. Камбала, было замечено, может подняться со дна и с «нескрываемым» любопытством виться около работающего молотком водолаза, в то время как треска испуганно уплывает от этого места подальше.

Тщетно, однако, искать у рыбы, например, что-либо подобное органам слуха человека. Она, по-видимому, воспринимает звуки всем телом. Можно сказать, слышит телом. У некоторых рыб от головы и до хвоста проходят боковые слизистые линии. Предполагают, что эти линии наиболее чувствительны к звуковому давлению.

Иные представители животного мира обладают тем, чего лишен человек. Им, оказывается, доступны ультразвуковые колебания, которые, исходя из своих возможностей, мы относим к разряду неслышимых звуков. Так, например, морская свинка, сова, серая мышь, барсук, водяные жуки, некоторые ночные бабочки воспринимают ультразвуковые колебания частотой до 100 тысяч герц. Даже собаки слышат ультразвук. Известен такой цирковой номер — собака «решает» арифметические задачи. Никто из зрителей не догадывается, что она просто выполняет команды, подаваемые дрессировщиком с помощью специального ультразвукового свистка.

Есть животные, которые не только воспринимают, но и сами излучают ультразвук, он им заменяет зрение.

Наибольший интерес с этой точки зрения представляют летучие мыши, дельфины и киты, у которых особенно хорошо развито ультразвуковое ви́дение, основанное на принципе эхолокации.

УЛЬТРАЗВУКОВАЯ ЭХОЛОКАЦИЯ В ВОЗДУХЕ

Летучие мыши, как правило,— это небольшие и, будем откровенны, для многих из нас неприятные и даже отталкивающие существа. Хотя, если не считать вид летучих мышей, питающихся кровью млекопитающих, они безобидны и даже полезны, поскольку основная пища для многих видов — насекомые. Но так уж повелось относиться к ним с предубеждением, основа которого, как правило, разного рода легенды и поверья, сложившиеся еще тогда, когда люди верили в духов и нечистую силу.

Летучая мышь — уникальный объект для ученых-биоакустиков. Она совершенно свободно ориентируется в полной темноте, не натыкаясь на препятствия. Более того, имея плохое зрение, летучая мышь на лету обнаруживает и ловит маленьких насекомых, отличает летящего комара от несущейся по ветру соринки, съедобное насекомое — от невкусной божьей коровки.

Впервые этой необычной способностью летучих мышей заинтересовался в 1793 году итальянский ученый Ладзаро Спалланцани. Вначале он пытался выяснить, какими способами различные животные находят дорогу в темноте. Ему удалось установить: совы и другие ночные существа хорошо видят в темноте. Правда, в полной темноте и они, как оказалось, становятся беспомощными. Но когда он начал экспериментировать с летучими мышами, то обнаружил, что такая полная темнота для них не помеха. Тогда Спалланцани пошел дальше: он попросту лишил зрения нескольких летучих мышей. И что же? Это ничего не изменило в их поведении, они так же превосходно охотились на насекомых, как и зрячие. В этом Спалланцани убедился, когда вскрыл желудок экспериментальных мышей.

Интерес к загадке возрастал. Особенно после того, как Спалланцани познакомился с опытами швейцарского биолога Шарля Жюрин, который в 1799 году пришел к выводу, что летучие мыши могут обходиться без зрения, но всякое серьезное повреждение слуха для них гибельно. Стоило заткнуть им уши, как они начинали слепо и беспорядочно натыкаться на все препятствия, возникающие на их пути.

Для того чтобы получить у летучих мышей полную потерю ориентировки, нужно было очень плотно затыкать им уши. А это не всегда удавалось, зато случалось нанести механические повреждения, и тогда опыт утрачивал чистоту: неизвестно было, что вызывало расстройство навигаторских способностей мышей.

Спалланцани изготовил миниатюрные медные трубочки и точно подогнал их к ушным отверстиям летучих мышей. В то время это было нелегкой технической задачей, если учесть, что диаметр ушных каналов летучих мышей меньше одного миллиметра. При вставленных, но открытых трубочках летучие мыши продолжали летать почти с обычным искусством. Но стоило плотно заткнуть трубочки, что не вызывало механического раздражения, как летучие мыши совершенно теряли ориентировку и беспорядочно натыкались на все препятствия. Наряду с этим на целом ряде разнообразных опытов было показано, что нарушения деятельности органов зрения, осязания, обоняния и вкуса никакого влияния на полет летучих мышей не оказывают.

Опыты Спалланцани были, несомненно, впечатляющими, но они явно опережали время. Спалланцани не мог ответить на главный и вполне по-научному корректный вопрос: если не слух или зрение, то что же в таком случае помогает летучим мышам так хорошо ориентироваться в пространстве? В то время ничего не знали ни об ультразвуке, ни о том, что у животных могут быть какие-то иные органы (системы) восприятия, а не только уши и глаза. Кстати, именно в таком духе и пытались объяснить некоторые ученые опыты Спалланцани: дескать, летучие мыши обладают тончайшим чувством осязания, органы которого расположены, скорее всего, в перепонках их крыльев...

Дело кончилось тем, что об опытах Спалланцани надолго забыли. Только в наше время, сто с лишним лет спустя, так называемая «спалланцаниевая проблема летучих мышей», как ее окрестили сами ученые, была разрешена. Это стало возможным благодаря появлению новых средств исследования на основе электроники. Физику из Гарвардского университета Г. Пирсу удалось обнаружить, что летучие мыши издают звуки, лежащие за порогом слышимости человеческого уха.

В последующих опытах, проведенных Г. Пирсом совместно с Р. Галамбосом, было установлено, что закрыва-

ние рта летучей мыши, лишающее ее возможности издавать эти высокочастотные звуки, оказывается столь же эффективным, как и плотное затыкание ее ушей. И в том и другом случае летучие мыши совершенно теряют способность обнаруживать как большие, так и малые предметы на своем пути. Вывод напрашивался сам собой: во время своих полетов летучие мыши ориентируются исключительно по отражениям высокочастотных звуков, почти непрерывно издаваемых ими в полете. Длины волн этих звуков короче, а частоты соответственно выше, чем у звуков, доступных для органов слуха человека, поэтому-то способность летучих мышей летать в полной темноте и представлялась столь таинственной.

Благодаря современным методам и средствам исследования пелена таинственности спала. Оказалось, что летучая мышь излучает направленные ультразвуковые сигналы и как бы ощупывает ими предмет. Число сигналов изменяется в зависимости от расстояния между летучей мышью и предметом. С уменьшением расстояния до предмета число сигналов повышается. Если расстояние до предмета 20 метров, летучая мышь издает 5—8 сигналов, если 1 метр — примерно 60 сигналов.

Диапазон частот, используемый летучей мышью, довольно широк — от 20 000 до 140 000 герц (такая частота соответствует длине волны около 2,5 миллиметра). Если перевести эти данные на язык музыкальной акустики, то это будет диапазон от третьей до девятой октавы.

Однако в действительности не все звуки, используемые летучими мышами для ориентации, совершенно не слышны. Хотя для летучих мышей лучше всего изученных видов более 99,9 процента излучаемой звуковой энергии относится к частотам, лежащим вне пределов человеческого слуха, имеется еще и очень небольшая область слышимых частот. Эти звуки настолько слабы, что их можно принять за шорох крыльев, поэтому-то Спалланцани их и не заметил. Всякий раз, когда летучая мышь издает короткий звуковой сигнал очень высокой частоты, если внимательно прислушаться, можно услышать также слабый звук, похожий на тиканье часов. Но часы, как мы знаем, тикают в одном и том же ритме, у летучих мышей этот ритм может заметно изменяться. Например, когда летучая мышь летит прямо, то она издает от пяти до двадцати тиканий в секунду, а при

посадке тиканье учащается и переходит в слабое жужжание.

Еще одну примечательную особенность заметили ученые у летучих мышей. Их механизм эхолокации тесно взаимодействует со зрительными и мышечными органами. Если у летучей мыши удалить глаза, их функцию возьмут на себя другие органы. При этом заметно повышается эффективность эхолокации: летучая мышь не только обнаруживает предмет, но и определяет его размеры и форму.

Как уже выяснилось, летучая мышь в полной темноте обнаруживает даже самых маленьких насекомых. Но оказалось, что это не предел возможностей ее природного ультразвукового локатора. Последние исследования показали, что летучие мыши распознают куда более мелкие предметы. Исследователи путем выработки обычных условных рефлексов приучили летучих мышей по сигналу влетать в затемненную комнату, перегороженную нейлоновой сеткой с тонкими, едва заметными нитями — до 0,08 миллиметра. И что же? Пролетая сквозь ячейки этой сетки, ни одна из мышей ни разу не задела нить. Так было установлено, что способность эхолокации у летучих мышей в 24 раза выше, чем предполагали раньше.

Летучих мышей несколько видов, и каждый вид обладает какими-то особенностями. Подковоносы, например, пользуются звуковыми сигналами простейшей формы почти чистых тонов любой частоты в пределах 60—120 килогерц. Длительность отдельных сигналов равна 50—100 миллисекундам. Название «подковоносы» возникло из-за сложной системы складок или мембран, окружающих их ноздри и рот двумя примерно концентрическими розетками, смутно напоминающими подкову, если смотреть на них спереди. Эта подкова играет роль маленького рупора, концентрирующего издаваемый летучей мышью звук в узкий пучок, который перемещается из стороны в сторону, когда летучая мышь «просматривает» окружающее пространство.

Летучие мыши в покое обычно подвешиваются задними лапками и висят вниз головой. У подковоносов тазобедренные суставы очень гибкие, благодаря чему они могут поворачиваться почти на 360 градусов и с помощью ультразвукового пучка прощупывать все окружающее пространство. Они часто срываются с места из этого по-

ложения и схватывают насекомое, пролетающее в пределах их досягаемости. Эти зверьки обитают в Европе, Азии, Австралии и Африке.

Есть летучие мыши, питающиеся главным образом растительными плодами. Звуки, издаваемые этими летучими мышами, гораздо слабее, чем те, что излучают подковоносы, и представляют собой очень короткие щелчки длительностью от доли миллисекунды до 2—3 миллисекунд. Форма волны этих импульсов сложна, а частоты их находятся в пределах 10—150 килогерц.

Летучих мышей, питающихся плодами, местные жители иногда называют грабителями. И есть за что: в ряде районов индийского штата Керала ночные животные совершают поистине опустошительные налеты на плантации кокосовых пальм. Только в районе Аллеппи летающие грызуны уничтожили с начала сезона 1983 года более полутора миллиона кокосовых орехов. Бороться с вредителями очень трудно, поскольку днем они скрываются в труднодоступных ущельях и пещерах, а свои налеты совершают ночью. Фермерам остается только подсчитывать урон после каждого ночного нашествия и ждать помощи от властей.

Наибольшее число легенд и «страшных» историй связано с летучими мышами, которых, как считает автор статьи о летучих мышах в «Советском энциклопедическом словаре», по ошибке называют вампирами за то, что они питаются кровью живых животных и людей *. Не нарушая сна своей жертвы, они своими острыми зубами делают небольшие надрезы, впускают обезболивающий состав и слизывают вытекающую кровь, пока она не свернется. Эти летучие мыши не ведут активного преследования летающих насекомых, и интенсивность издаваемых ими звуков так мала, что их можно зарегистрировать только при помощи самой чувствительной аппаратуры. Поэтому этих летучих мышей называют шепчущими.

Обыкновенные насекомоядные летучие мыши, хорошо известные в Северной Америке и Европе, охотятся за насекомыми на открытом воздухе, гоняясь за своей ускользающей жертвой и ловя ее на лету. Они обладают

---

* В действительности же, как следует из того же «Советского энциклопедического словаря», вампиры (род млекопитающих из подотряда летучих мышей) питаются плодами и насекомыми.

поразительной маневренностью, способны проделывать на лету мгновенные повороты и другие «акробатические трюки», преследуя порхающих в неправильном полете мелких ночных бабочек, летающих жуков и комаров. Сигналы этих летучих мышей почти той же интенсивности, что и у подковоносов, длятся всего по нескольку миллисекунд и отличаются характерной частотной структурой. Каждый сигнал начинается с очень высокой частоты, которая за короткое время падает почти на целую октаву.

Обыкновенные малые рыжие летучие мыши начинают каждый сигнал с частоты 90 килогерц и заканчивают его на частоте 45 килогерц. Так как каждый сигнал длится всего около двух миллисекунд, то изменение частоты оказывается чрезвычайно быстрым. Длина начальных волн составляет всего лишь половину длины волны в конце сигнала. Такой звук называется частотно-модулированным, а самих летучих мышей называют частотно-модулирующими. Эти летучие мыши исследованы гораздо детальнее, чем другие. Установлено, что они необычайно хорошо приспособлены для жизни в полете. Малая летучая мышь массой семь граммов обычно успевает наловить за один час активной охоты один грамм насекомых. Еще более мелкая летучая мышь, весившая всего четыре грамма, на глазах исследователей ловила комаров в таком быстром темпе, что за 15 минут охоты увеличила свою массу на 10 процентов. Если считать массу комара равной примерно 0,002 грамма, то, стало быть, за эти 15 минут было поймано 175 комаров — один комар за шесть секунд!

Исследователи долгое время считали, что летучие мыши охотятся без промаха, так как их жертвы лишены слуха и поэтому им трудно спасаться. На опыте это не подтвердилось. Некоторые виды ночных бабочек — излюбленное лакомство летучих мышей — чрезвычайно чутко реагировали на ультразвуковые сигналы, которыми их «ощупывали» ночные хищники, и скрывались от нападения. Бабочки улавливают ультразвуки с помощью так называемых тимпональных органов, назначение которых первоначально было неизвестно. Теперь их роль стала ясна: когда бабочек облучили ультразвуком, в тимпональном нерве были обнаружены импульсы. Это означает, что бабочки действительно реагируют на ультразвуковые сигналы летучих мышей. Более того, установ-

лено, что у ночной бабочки тимпанальный нерв работает как своеобразная высокочувствительная и быстродействующая установка, обнаруживающая летящие цели.

Дальнейшие наблюдения за ночными бабочками показали, что они воспринимают звуковые колебания в пределах 3—150 тысяч герц. Следовательно, диапазон ультразвуковых сигналов, излучаемых летучей мышью, совпадет с диапазоном восприятия ультразвуков ночной бабочкой. Чувствительность бабочек очень высока. На расстоянии около 30 метров от источника ультразвуковых колебаний бабочка спокойно меняет направление своего полета. Но стоит приблизить источник ультразвука, как бабочка начинает метаться из стороны в сторону, падает, сложив крылья. Реакция была моментальной — от 0,2 до 1 секунды.

УЛЬТРАЗВУКОВАЯ ЭХОЛОКАЦИЯ В ВОДЕ

Вода, как мы знаем, плотнее воздуха. Она хорошо проводит звук, но плохо пропускает свет. Световая энергия, проникающая в воду, быстро поглощается, рассеивается и частью преобразуется в тепловую энергию. В прозрачной воде открытого океана яркость освещения убывает с глубиной в среднем в десять раз на каждые 50 метров.

Известно, что солнечный свет состоит из лучей видимого и невидимого спектра. Видимая часть спектра включает все цвета радуги. К невидимой части относятся ультрафиолетовые и тепловые инфракрасные лучи. Морская вода обладает избирательной способностью к поглощению световых лучей. До глубины 0,5 метра поглощаются только инфракрасные лучи, благодаря чему освещение в полуметровом верхнем слое остается белым. На глубине 5 метров к нормальному солнечному свету слегка примешиваются синевато-зеленоватые тона. Дальше происходит энергичное поглощение красных и желтых лучей. Синевато-зеленоватые тона становятся преобладающими. На глубине 50 метров сине-зеленые тона сгущаются, приобретая цвет поверхности моря.

Чем глубже, тем меньше проникает света. Нетрудно представить себе, что происходит на большой глубине —

там царит мрак. Вот как один из исследователей подводных глубин описал свои впечатления о 900-метровой глубине: «Еще глубже глаз не улавливает, а ум отказывается словами определять цвета. Солнце побеждено, краски изгнаны до тех пор, пока человеческое существо не проникнет сюда и не пронзит желтым электрическим лучом пространство, которое оставалось бесконечно черным в течение биллионов лет».

Тем не менее в этом «бесконечно черном» пространстве существует жизнь, что для науки представляет огромный интерес. Ведь необычные условия (высокое давление, отсутствие света и пр.) должны непременно повлиять на форму живущих там существ, их строение и образ жизни. Ясно, например, что зрение в привычном для нас представлении там не нужно, эту утрату природа компенсирует развитием каких-либо других органов восприятия внешней среды.

Вот возьмем дельфинов. В воде они могут видеть на расстоянии не более 30 метров, причем, конечно, в тех слоях воды, куда достигает дневной свет. Поэтому хотя они и не живут постоянно на больших глубинах, недостаточность зрительного восприятия у них все равно компенсирована хорошим слухом, являющимся важным элементом сложной системы эхолокации.

У дельфинов чрезвычайно хорошо развит голосовой и слуховой аппарат, что позволяет им издавать и воспринимать звуки в широком диапазоне частот — от нескольких сотен до нескольких десятков тысяч герц. Именно поэтому так разнообразны звуки, издаваемые ими: напоминают они то визг и свист, то лай и щелканье, а иногда и скрип. С музыкальной точки зрения голос дельфина перекрывает все диапазоны баритона, тенора, сопрано и даже летучей мыши, доходя до 160—180 килогерц, то есть до фа десятой октавы. В общей сложности голос дельфина охватывает 12 октав — никем из живых существ не превзойденный рубеж.

Исследования последних лет показали, что дельфинов с полным основанием можно отнести к очень «болтливым» животным. Установлено также, что дельфиний язык отличается от языка других животных. Причем настолько, что даже ученые, скептически относящиеся к утверждениям о «высоком интеллекте» дельфинов, об их способности разговаривать между собой «почти по-человечески» и т. д., признают сложность их языка, а стало

быть, и его большую коммуникационную роль в жизни дельфинов. Но это, как говорится, одна сторона «дельфиньей проблемы». Другая ее сторона в том, что дельфины имеют современнейший эхолокационный аппарат, который, кстати сказать, изучен лучше, чем система их звукового общения.

Дельфин безошибочно подплывает к дробинке, брошенной в воду на расстоянии 15—20 метров от животного, предварительно «ощупав» ее ультразвуковым пучком. Ставились и такие опыты: дельфину надежно закрывали глаза и сажали в построенный в воде лабиринт. Животное выходило из него, не коснувшись препятствий ни одним участком тела. Дельфин никогда не ударится в стеклянную перегородку, поставленную на его пути. Как правило, он легко отыскивает в сетях «щели», через которые и проходит.

Дельфины прекрасно ориентируются в самых различных водоемах и отличают живые организмы от неживых предметов. Во время одного из экспериментов в бассейн с мутной водой подвесили 36 полых металлических стержней. Их разместили в шесть рядов по шесть в каждом на расстоянии 2,5 метра друг от друга. Дельфины плавали между ними так же свободно, как и в бассейне без этих препятствий.

У дельфинов нет голосовых связок. Чем же тогда они издают звуки? Звуки рождаются в специальных полостях, заполненных воздухом. При сжатии полостей происходит вибрация перепонок и возникают ультразвуковые и звуковые колебания. Роль же фокусирующего элемента, как предполагают ученые, выполняет жировая линза. Отразившись от костей черепа, ультразвуковые лучи проходят через жировую линзу и в ней фокусируются. В зависимости от расстояния до пеленгуемого объекта дельфин сжимает или разжимает линзу, и фокусировка бывает большей или меньшей.

Отличный слух дельфина позволяет ему улавливать малейшие звуки в ультразвуковом, звуковом и даже инфразвуковом диапазонах. Из бесчисленного количества звуков дельфины легко выделяют голоса своих сородичей или звуки, исходящие от организмов, служащих им пищей. Дельфины с поразительной точностью определяют направление на источник звука. Секрет такой способности заключен в органах слуха, надежно изолированных от костей черепа. Изоляция достигается тем, что среднее

и внутреннее ухо окружено со всех сторон воздушными полостями и камерами, заполненными пеной из жировой эмульсии. Пена поглощает звуковые колебания, поэтому внутреннее ухо ограждено от посторонних раздражений. Звуковые волны проходят только через наружный слуховой проход. Благодаря направленному восприятию звука дельфин точно определяет положение его источника. При необходимости дельфины способны изменять в миллиард раз мощность своего излучения и в тысячу раз — частоту повторения ультразвуковых импульсов.

В эхолокационном устройстве китообразных имеются два самостоятельных, но взаимосвязанных механизма: передающий и приемный. Передающее устройство включает три пары воздушных мешков, тесно связанных с носовым каналом, гортань, лобно-носовую подушку, или жировую линзу, и рефлектор, образованный передней поверхностью черепа. Приемное устройство, к которому возвращаются отраженные звуки, включает органы слуха, нижнюю челюсть и, возможно, механорецепторы головы.

В эхолокационном устройстве дельфина передающий механизм очень сложен. Главную роль в нем играют воздушные мешки, расположенные в мягких тканях головы над костными ноздрями. У разных видов дельфинов воздушные мешки устроены по-разному. Как правило, у дельфинов таких мешков три пары. Первая пара — вестибулярные мешки — открывается в носовой канал на один сантиметр ниже наружной щели дыхала. Вторая пара — трубчатые мешки — залегает ниже первой пары в виде двух подкововидных трубок вокруг ноздри. Они открываются с заднебоковой стороны носового канала. Третья пара — нижние мешки — залегает на межчелюстных костях и открывается как раз впереди наружного края костных ноздрей, у самого основания мягкой части носового канала. Эта пара связана со второй соединительными проходами. Все мешки работают с помощью сложной системы носочелюстных мышц. Роль каждого мешка в механизме звукообразования очень сложна и еще не до конца изучена.

Функции мешков в звукообразовании различные. Одна афалина, например, щелкала левыми воздушными мешками, а свистела правыми, но могла делать и то и другое одновременно. Левая и правая части звукосигнального аппарата могут действовать независимо: пра-

вая — издавать свист в воздухе или под водой, а левая — щелкать.

Как уже было сказано, приемный механизм эхолокационного устройства дельфина позволяет ему воспринимать не только звуки слышимых частот, но и звуки ультразвукового и инфразвукового диапазонов. Дельфины прекрасно разбираются в многоголосом хаосе моря и очень точно определяют, с какого направления поступает звук. В воде это не может сделать ни одно наземное млекопитающее. Вибрация черепа под воздействием звуковых волн мешала бы этому, если бы уши китообразных не были изолированы от костей черепа.

Диапазон воспринимаемых дельфином частот лежит в пределах от нескольких десятков герц до 196 килогерц. Это в 10 раз выше верхнего предела слышимости у человека. Дельфин может воспринимать звуки такой частоты, которые сам не в состоянии воспроизвести, в чем и заключается одно из отличий дельфина от наземных млекопитающих: последние слышат звуки такой частоты, какие издают сами.

Дельфины, оказывается, воспринимают также инфразвуки («голос моря») — предвестники шторма. Перед надвигающейся бурей, угрожающей выбросить их на отмель, они обычно уходят из прибрежной зоны. Очевидно, они улавливают шум волн, омывающих их тело, всплески на поверхности моря, гул, издаваемый косяками рыб, ракообразными, морскими млекопитающими, а также отраженное эхо разных частот. Способность дельфинов воспринимать звуки в очень широких пределах частот позволяет им получать исключительно полную информацию об окружающей среде, что вполне компенсирует недостаточное развитие их зрительных и вкусовых ощущений.

Высокое развитие слуха у китообразных способствовало формированию у них превосходного голосового аппарата и весьма богатой звуковой сигнализации. Северный дельфин белуха получил прозвище морской канарейки за свою способность хрюкать, стонать, свистеть, издавать звуки, напоминающие плач ребенка, женский пронзительный крик, шум толпы, игру на флейте, щебетание птиц. Слух и голос китообразных стали предметом тщательных экспериментальных исследований. Каждый вид китообразных пользуется несколькими типами звуков. Ученые пытаются разобраться во множестве сигна-

лов китообразных, классифицировать их в зависимости от физических характеристик и назначения.

Уже установлено, что сигналы по физическим свойствам разделяются на непрерывные и прерывные, состоящие из серии импульсов или щелчков. Все звучания дельфинов по физическим свойствам можно объединить в три класса: эхолокационные, ультразвуковые щелканья (до 170 килогерц); непрерывные звуки, свисты (частотой от 4 до 20 килогерц); звуки сложного спектра — комплексные волны высокой амплитуды, называемые по внешней аналогии с сигналами других животных кряканьем, мяуканьем, лаем, воем, жужжанием, ревом. Оказалось, что один и тот же дельфин способен издавать акустические колебания двух или даже всех трех классов одновременно. По биологическому значению акустические сигналы дельфинов можно условно подразделить на две группы: эхолокационные сигналы первого класса, которые издаются для ориентации, навигации, рекогносцировки, для разыскивания пищи; коммуникационные сигналы второго класса — для связи или общения со своими сородичами. Акустические же сигналы третьего класса, по-видимому, используются и как эхолокационные, и как коммуникационные.

На основании опытов в океанариумах и наблюдений в природе сделан общий вывод, что эхолокация у китообразных — главный способ распознавания объектов, погруженных в воду. Ультразвуковыми сигналами они «изучают» окружающую обстановку и получают необходимую информацию. Принцип действия эхолокационного устройства дельфинов широко применяется в технике в виде сонаров (sonar происходит от начальных букв трех английских слов: sound — «звук», navigation — «навигация» и range — «дальность»). Корабельные приборы излучают в воду высокочастотные импульсы; отразившись от каких-либо объектов, они приходят обратно на принимающее устройство и приносят с собой необходимую информацию. Информация эта однозначна, то есть ее принимать можно только так: впереди (сбоку, внизу, сзади) какой-то объект — риф, мель, айсберг, судно и т. д. На этом же принципе работают эхолоты при измерении глубин и поисках косяков рыб.

Ультразвуковые приборы — надежные помощники в кораблевождении и в рыболовстве. Однако эффективность природных локаторов дельфинов оказалась гораздо выше

технических характеристик существующих сонаров и эхолотов. Гидролокатор дельфина отличается в лучшую сторону по сравнению с корабельной гидроакустикой, более устойчив к помехам, имеет большую ширину спектра излучаемых колебаний, совершенную модуляцию по интенсивности и частоте повторения импульсов. Гидролокатор дельфина — природный чудо-прибор, непревзойденный пока прототип для моделирования в технике.

Сонар дельфинов объединяет оба основных принципа современной технической гидроакустики: активный поиск, когда посылается высокочастотный импульс и улавливается отраженный эхо-сигнал, и пассивное прослушивание шумов и звуков, которыми богата среда обитания животного. Гидробиоников привлекает феноменальная точность локации дельфинов и замечательная портативность их локатора, превосходящая все образцы аппаратов того же назначения, созданных человеком. Например, рыбопоисковый эхолот «Дельфин» весит столько же, сколько дельфин афалина, в то время как гидролокатор самой афалины составляет ничтожную часть ее массы.

Поражает способность дельфинов выделять из хаоса звуков только необходимые. В этом неоднократно убеждались ученые, исследовавшие поведение животных, содержавшихся в дельфинариях — специальных бассейнах. Были, в частности, поставлены такие эксперименты. Записали (а современная техника это позволяет) гидролокационные сигналы афалин, а потом этими сигналами их же и «облучили». Казалось бы, это должно было афалин «сбить с толку», обмануть, однако ничего подобного не произошло. Афалины каким-то образом сумели «разоблачить» обман. Можно предположить, что органы гидролокации дельфинов (как и органы чувств у нас, у людей, только на ином качественном уровне) связаны с мозгом, где и происходит необходимый анализ внешней информации.

Коммуникационные сигналы китообразных звучат поразному. Но что скрывается за каждым сигналом, какому поведению животного соответствуют эти звучания? В какой ситуации они издаются и какие вызывают ответные действия у сородичей? Ответы на эти вопросы еще только начинают проясняться. Ответы животных на сигналы в неволе и в море не всегда совпадают.

Наиболее распространенный звук у дельфинов — свист частотой 7—18 килогерц, свидетельствующий о их

возбужденном состоянии. Свист является сигналом поддержания стайности. Детеныши сразу после рождения начинают пользоваться таким сигналом и реагируют на свистящий призыв самки.

Другой характерный звук — лай, представляющий собой короткие звуки длительностью 50—350 миллисекунд с частотой от сотен герц до 10 килогерц. По мнению исследователей, дельфины лают в состоянии сильного возбуждения, например во время кормежки, когда в бассейне появляется человек, а также в брачный период.

Сигнал, слышимый как хлопок в ладоши, сопровождаемый быстрым открыванием и закрыванием рта, имеет значение угрозы или доминирования. Крупный самец, возглавляющий стадо, такими хлопками запугивает более слабых сородичей. Самка подобным знаком и жестом выражает недовольство, когда к ее детенышу или к ней самой приближается агрессивно настроенный самец. При испуге дельфины издают сигнал тревоги или страха. Он слышится как резкий треск, перекрывающий по силе эхолокационные скрипы и лай дельфинов. Механизм, с помощью которого создается столь энергичный звук, не установлен.

У дельфинов существует сигнал боли, напоминающий громкий, отрывистый визг поросенка. Сигнал боли — это редкий сигнал, так как его издают далеко не все загарпуненные китообразные. Среди акустических сигналов китообразных выделяется сигнал бедствия. Сигнал, при котором забывается собственная безопасность и животные мчатся к месту, откуда подается призыв о помощи. У разных видов китообразных этот сигнал звучит по-разному и особенно действует в тех случаях, когда сородичу грозит опасность задохнуться под водой. У афалины он слышится как двухколенный продолжительный свист, повторяющийся через разные интервалы до тех пор, пока не подоспеет помощь.

Некоторые звуки дельфины издают лишь после длительного контакта с человеком, они приобретают некоторое сходство с голосом дрессировщика. Сравнение виброграмм с записью голосов дельфинов и человека подтвердило это. Если голос дрессировщика звучал с частотой от 200 до 3000 герц, то голос дельфина, подражающего дрессировщику, имел частоту от 1000 до 8000 герц.

Интерес к дельфинам огромный — как научный, так и практический. Ученые, в частности, увлечены идеей «одомашнивания» этих весьма «сообразительных» морских животных. Будущие обязанности первых морских домашних животных по своему многообразию могут быть подобны тем, какие выполняет собака, одомашненная почти 20 тысяч лет назад. Собака используется для выполнения самых различных действий: сторожевой и розыскной службы, охоты, охраны и защиты, переноски и перевозки грузов, связи, помощников геологов, выпаса скота, поиска мин, спасения утопающих, выноса раненых, сопровождения слепых и др.

Существует мнение, что дельфины, эти высокоорганизованные обитатели моря, могут стать первыми морскими «домашними» животными. Одомашнивание дельфинов — кропотливая и трудная работа, несмотря на то что они легко приобретают навыки при обучении, быстро вырабатывают условные рефлексы и стойко их сохраняют. Видимо, только при содружестве разных специалистов — биологов, физиологов, физиков — здесь может быть достигнут успех. Дельфины могут стать помощниками океанологов и других специалистов, изучающих Мировой океан. Уже сейчас известно, что дельфина можно приучить быть связистом при подводных работах. Он станет помощником океанологов — носителем датчиков для сбора информации о солености, радиоактивности, температуре, течениях на различных глубинах. Он будет разведчиком морского дна, доставляя пробы грунта, спасателем утопающих, защитником человека от акул, буксировщиком пловцов, переносчиком грузов. Дельфин будет нести поисковую службу в море, отыскивая различные объекты, интересующие человека, одомашненные и обученные дельфины будут полезны в рыбном хозяйстве. Они смогут обнаруживать и удерживать до прибытия рыболовецкого судна рыбьи косяки, загонять рыбу в сети, причем именно тот вид, который нужен. Недаром уже сейчас очень высоко ценят этих помощников рыболовства в некоторых районах мира.

Раскрывая «секреты» летучих мышей, дельфинов и других животных, ученые и специалисты все больше убеждаются в том, что у великого изобретателя — природы есть чему поучиться. И не просто поучиться, а использовать на практике многие из «живых патентов».

ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ

В 1880 году французские ученые братья Жак и Пьер Кюри открыли пьезоэлектрический эффект. Сущность его заключается в том, что если деформировать пластинку кварца, то на ее гранях появляются противоположные по знаку электрические заряды. Следовательно, пьезоэлектричество — это электричество, возникающее в результате механического воздействия на вещество («пьезо» по-гречески означает «давить»).

Впервые пьезоэлектрические свойства были обнаружены у горного хрусталя — одной из разновидностей кварца. Горный хрусталь представляет собой прозрачные, бесцветные, похожие на лед кристаллы. Советский минералог А. Е. Ферсман в книге «Занимательная минералогия» писал: «Возьмите в руку обломок горного хрусталя и такой же кусочек стекла — оба похожи и по своему цвету, и по прозрачности. Если их сломать, у них будут одинаково острые, режущие края и форма излома. Но будет и различие: горный хрусталь долгое время останется холодным в вашей руке, стекло очень скоро сделается теплым... Знали ли это свойство древние греки или нет — неизвестно, но во всяком случае это они дали нашему камню название «хрусталь» от греческого наименования «лед», так как действительно горный хрусталь очень похож на лед...»

В природе встречается почти двести разновидностей кварца. Это и золотисто-желтый цитрин, кроваво-красный сердолик, красновато-коричневый с золотым отливом авантюрин, фиолетовый аметист и многие другие. Почти десятую часть земной коры составляют различные виды кварца. Даже обыкновенный песок состоит главным образом из зерен кварца.

Кварц широко применяется в науке и технике. Он пропускает ультрафиолетовые лучи, тверд и тугоплавок. Посуду из кварцевого стекла можно раскалить докрасна и сразу погрузить в ледяную воду. Он устойчив почти ко всем кислотам и плохо проводит электрический ток. Но самым замечательным его свойством считается пьезоэлектричество. Если пластину, определенным образом вырезанную из кристалла кварца, сжимать и разжимать, то на ее гранях будут возникать электрические заряды с противоположными знаками. Чем сильнее сжатие, тем больше заряд. Возникновение электрических зарядов на

гранях кварцевой пластинки при ее деформации получило название прямого пьезоэлектрического эффекта.

Если же к такой кварцевой пластинке подвести электрический заряд, она изменит свои размеры. Чем больше заряд, тем сильнее деформируется пластинка. При действии на пластинку переменного электрического поля она сжимается или разжимается в такт изменению знаков приложенного напряжения. Если последнее изменяется с ультразвуковой частотой, то и пластинка колеблется также с ультразвуковой частотой, на чем и основано применение кварца для получения ультразвуковых волн. Изменение размеров кварцевой пластинки под действием электрических зарядов называется обратным пьезоэлектрическим эффектом.

Прямой пьезоэлектрический эффект используют в приемниках ультразвуковых колебаний, где последние преобразуются в переменный ток. Но если к такому приемнику приложить переменное напряжение, в полной мере обнаруживается и обратный пьезоэффект. В этом случае переменный ток преобразуется в ультразвуковые колебания и приемник работает как ультразвуковой излучатель. Следовательно, пьезоэлектрический приемник и излучатель могут быть представлены в виде одного прибора, которым можно поочередно излучать и принимать ультразвуковые колебания. Такой прибор называют ультразвуковым акустическим преобразователем.

Акустические преобразователи с успехом используются в различного рода электроакустических системах, в частности в системах, предназначенных для акустических и гидроакустических измерений и исследований. Пьезоэлектрические приборы широко применяются и при исследовании космического пространства. Ныне их представляют некоторые датчики, передающие данные о состоянии космонавта, об условиях внутри космического корабля, предупреждающие о метеоритной опасности и т. п.

Пьезоэлектрические приборы помогают «ощупать» детали самолетов, выявить ошибки в их расчетах и предотвратить опасные последствия этих ошибок; «заглянуть» в ствол стреляющего орудия, чтобы измерить давление или получить другие данные. Пьезоэлектричество используется в радиотехнике и телевидении. Пьезоэлектрические приборы помогают находить косяки рыб, исследовать земные недра, искать полезные ископаемые,

ставить диагнозы и лечить людей, анализировать и ускорять химические процессы и т. д.

Одним из основных материалов, применяемых для изготовления ультразвуковых преобразователей, долгое время считался кварц. Но излучатель, сделанный из маленькой кварцевой пластинки, имеет небольшую мощность. Чтобы повысить ее, увеличивают площадь излучающей поверхности путем составления пластинок кварца в виде своеобразной мозаики.

В природе кристаллы кварца встречаются в основном сравнительно небольших размеров, хотя и бывают исключения. В Восточных Альпах геологи в одном гнезде нашли шесть кристаллов горного хрусталя общей массой свыше полутора тонн. Еще более уникальную находку обнаружили уральские геологи, которые открыли месторождение хрусталя с целым семейством кристаллов-великанов. Сначала из породы извлекли кристаллы массой 800 килограммов. Последующий упорный поиск дал совершенно ошеломляющие результаты — было найдено созвездие из двадцати прозрачных чистых кристаллов. Их общая масса превысила 9 тонн. Однако такие находки не могут удовлетворить все возрастающие потребности науки и техники в кристаллах кварца. Поэтому их пытаются выращивать искусственно в лабораториях, но, к сожалению, они растут медленно и производство их дорогостоящее.

В поисках других пьезоэлектрических материалов ученые обратили внимание на сегнетову соль. Впервые ее получил из солей винной кислоты французский аптекарь Сегнет. Сегнетова соль легко обрабатывается, кристалл сегнетовой соли можно разрезать обыкновенной ниткой, смоченной водой. По сравнению с другими пьезокристаллами, в том числе и по сравнению с кварцем, кристалл сегнетовой соли обладает значительно большим пьезоэлектрическим эффектом, самое ничтожное механическое воздействие на пластинку приводит к появлению электрических зарядов. Однако у сегнетовой соли есть и серьезные недостатки, которые ограничивают ее практическое применение. Это в первую очередь низкая температура плавления — около 60 градусов, при которой кристалл сегнетовой соли теряет пьезоэлектрические свойства, и они уже больше не восстанавливаются. Сегнетова соль растворяется в воде и, следовательно, боится влаги. Кро-

ме того, она непрочна и не выдерживает больших механических нагрузок.

Изыскания новых пьезоэлектрических материалов особенно настойчиво проводились во время второй мировой войны. Они были вызваны «кварцевым голодом», возникшим вследствие широкого использования пьезокварца в гидроакустических приборах и в военной радиоэлектронике. Так, для изготовления пьезоэлектрических преобразователей в то время применялись кристаллы дигидрофосфата аммония. Этот материал стабилен по частоте, позволяет работать с большими мощностями и в широком диапазоне частот. Долгое время применялись и другие пьезоэлектрические материалы, такие, как фосфат аммония, сульфат лития и дигидрофосфат калия. В гидроакустических преобразователях их использовали в виде мозаичных пакетов. Однако всем этим пьезокристаллам присущ общий недостаток — малая механическая прочность. Поэтому ученые настойчиво искали заменитель, который был бы близок к ним по пьезоэлектрическим свойствам и не имел бы вышеуказанного недостатка. И такой заменитель был найден советскими учеными, работавшими под руководством члена-корреспондента Академии наук СССР Б. М. Вула. Это был титанат бария, который не является кристаллом, как кварц и сегнетова соль, и сам по себе не обладает пьезоэлектрическими свойствами.

Титанат бария получают искусственным путем, так как в недрах земли он встречается очень редко. Для этого смесь двух минеральных веществ — углекислого бария и двуокиси титаната — обжигают при очень высокой температуре. Получается желтовато-белая масса, которая по своему виду и механическим свойствам напоминает обыкновенную глину. Этой массе, как и глине, можно придать любую форму, но она будет механически прочной и не растворимой в воде. А для того чтобы титанату бария придать пьезоэлектрические свойства, обожженную массу помещают в сильное электрическое поле, затем охлаждают. В результате происходит поляризация кристалликов титаната бария, их диполи (совокупность двух разноименных, но равных по абсолютной величине электрических зарядов, находящихся на некотором расстоянии друг от друга) занимают одинаковое положение, а после охлаждения фиксируются, как бы «замораживаются» в этом состоянии.

У полученного материала пьезоэлектрический эффект в 50 раз больше, чем у кварца, а стоимость его невысокая, так как для его изготовления имеется очень большое количество сырья. К недостаткам титаната бария относятся большие механические и диэлектрические потери, что приводит к его перегреву, а при температуре более 90 градусов значительно снижается пьезоэлектрический эффект.

Керамику из титаната бария можно резать, шлифовать, полировать, придавая преобразователю необходимые форму и размеры (плоская пластина, цилиндр, полусфера, часть сферы и т. д.). У преобразователей из титаната бария более эффективно превращение электрической энергии в механическую, большая стойкость к электрическому пробою, они могут работать при малых напряжениях. Кроме того, ультразвуковые преобразователи из титаната бария способны работать в импульсном режиме.

Для изготовления пьезоэлектрических преобразователей используют и другую пьезокерамику: смесь циркония с титанатом свинца (ЦТС), у этой пьезокерамики пьезоэффект вдвое больше, чем у титаната бария. Пьезокерамика ЦТС не растворима в воде, и ее также можно обрабатывать механическим способом.

Одновременно продолжались поиски кристаллов, обладающих пьезоэлектрическими свойствами и удовлетворяющих необходимым техническим требованиям. Так в поле зрения ученых попал сернистый кадмий. Помимо того что он обладает исключительной способностью усиливать ультразвуковые колебания, на его основе можно изготовить ультразвуковой преобразователь для очень высоких частот, совершенно не доступных кварцу и титанату бария. Исследователи предполагают, что кристалл сернистого кадмия окажется рекордсменом по количеству возможных применений. Он не только может служить усилителем и преобразователем ультразвука, но и может быть использован наряду с германием и кремнием как обычный полупроводник. Кроме того, сернистый кадмий — отличное фотосопротивление.

Несколько упрощая, можно сказать, что пьезоэлектрический преобразователь представляет собой один или несколько соединенных определенным образом отдельных пьезоэлементов с плоской или сферической поверхностью, приклеенных на общую металлическую пласти-

ну. Для получения большой интенсивности излучения применяют фокусирующие пьезоэлектрические преобразователи, или концентраторы, которые могут иметь самые различные формы (полусферы, части полых сфер, полые цилиндры, части полых цилиндров). Такие преобразователи используют для получения мощных ультразвуковых колебаний на высоких частотах. При этом интенсивность излучения в центре фокального пятна у сферических преобразователей в 100—150 раз превышает среднюю интенсивность на излучающей поверхности преобразователя.

МАГНИТОСТРИКЦИОННЫЙ ЭФФЕКТ

В 1847 году Дж. Джоуль заметил, что если поместить стержень из ферромагнитного материала в направленное вдоль него магнитное поле, геометрические размеры стержня изменятся — проще говоря, он деформируется. Это явление называется магнитострикционным эффектом, или магнитострикцией (магнит и латинское strictio — сжатие). Ферромагнетизм, то есть «железный магнетизм»,— это совокупность магнитных свойств железа. К числу ферромагнитных материалов, кроме железа, относится ряд металлов, некоторые сплавы и окислы металлов.

Магнитострикционный эффект, как и пьезоэлектрический, обратим. Если по обмотке, наложенной на ферромагнитный стержень, пропустить переменный ток, то под воздействием изменяющегося магнитного поля стержень будет деформироваться (удлиняться и укорачиваться) — прямой магнитострикционный эффект. Если же ферромагнитный стержень, на который наложена обмотка, сжимать или растягивать, то его магнитные свойства будут изменяться, а в обмотке возникнет переменный ток — обратный магнитострикционный эффект.

Изучение магнитострикционного эффекта важно потому, что магнитострикционные материалы применяются для изготовления различных приборов и устройств, например магнитострикционных излучателей, датчиков для исследования деформаций и напряжений в деталях машин и т. п.

Для изготовления магнитострикционных преобразователей применяются пермендюр, никель и железоалюми-

ниевые сплавы — альферы. Наиболее высоким магнитострикционным эффектом обладает сплав платины с железом, но из-за большой стоимости этот сплав практически не применяется. Чаще магнитострикционные преобразователи делают из тонких листов, склеенных между собой. Толщина пластин обычно выбирается 0,1—0,3 миллиметра. На сердечник, собранный из тонких листов, накладывается обмотка.

По сравнению с пьезоэлектрическими магнитострикционные преобразователи имеют преимущества в том, что у них большие величины относительных деформаций, большая механическая прочность, большой срок службы, они менее чувствительны к температурным воздействиям.

Магнитострикционные преобразователи различаются по устройству в зависимости от назначения. Плоские преобразователи квадратной или прямоугольной формы применяются в технологических процессах очистки, а также при интенсификации различных производственных процессов. Преобразователи цилиндрической формы применяются для механической обработки хрупких и сверхтвердых материалов, сварки, пайки и лужения, а также в других производственных процессах.

Во многих ультразвуковых промышленных установках, аппаратах и станках применяются магнитострикционные преобразователи типа ПМС. Отечественной промышленностью разработан и изготовлен ряд новых преобразователей. Так, ультразвуковой магнитострикционный преобразователь ПМС-15А-18 предназначен для возбуждения ультразвуковых колебаний в твердых телах.

Промышленностью освоено также серийное производство магнитострикционных преобразователей с равномерно распределенным полем, у которых при той же потребляемой мощности значительно повышается интенсивность излучения (ПМС-26, ПМС-32, ПМС-36, ПМС-38, ПМС-38М). Погружной преобразователь ПМС-36 предназначен для очистки и ускорения гальванических процессов. Преобразователь ПМС-38 применяют при очистке листов белой жести перед лужением в автоматической линии металлургического завода.

Ультразвуковые магнитострикционные преобразователи ПМС-27, ПМС-39, ПМС-51 предназначены для возбуждения упругих колебаний ультразвуковой частоты в твердых телах. Эти преобразователи в отличие от ранее

выпускавшихся соответствуют установленному международной конвенцией диапазону рабочих частот. Преобразователи ПМС-27 и ПМС-39 рассчитаны для работы на частоте 22 000 герц, а преобразователь ПМС-51 — на частоте 44 000 герц.

Ученые и конструкторы настойчиво работают над совершенствованием ультразвуковых преобразователей, добиваясь значительного улучшения технических характеристик и расширения их сфер применения. Так, были созданы колебательные системы с согласующими элементами. Преимущество их — согласование полного сопротивления преобразователя с волновым сопротивлением среды.

Пьезоэлектрические и магнитострикционные преобразователи значительно различаются по принципу действия и конструктивному выполнению. Однако они взаимно дополняют друг друга. Как первые, так и вторые используются в ультразвуковых приборах и устройствах. Пьезоэлектрические преобразователи применяются в тех случаях, когда необходимо получить и принять ультразвуковые колебания сравнительно больших частот (более 100 тысяч герц). Магнитострикционные преобразователи применяются для работы при сравнительно небольших частотах.

УЛЬТРАЗВУКОВЫЕ ГЕНЕРАТОРЫ

Ультразвуковые преобразователи (пьезоэлектрические и магнитострикционные) работают от источника питания электрической энергии. Эту задачу выполняют ультразвуковые генераторы, которые подразделяются на машинные и ламповые (полупроводниковые). К ультразвуковым генераторам предъявляются следующие основные требования: стабильность частоты, возможность плавного регулирования частоты и выходной мощности, надежность в работе, небольшие габариты.

Машинные генераторы, а точнее машинные преобразователи (умформеры), рассчитаны на работу с частотой до 20 килогерц и мощностью до 150 киловатт. Они просты по устройству и в обслуживании, экономичны, имеют большой коэффициент полезного действия (кпд), надежны в работе. Однако они не получили широкого распространения из-за низкой стабильности частоты и слож-

ности ее регулирования, а также из-за трудности получения частоты более 20 килогерц без дополнительных устройств-множителей.

Ламповые генераторы имеют более широкое применение для возбуждения в преобразователях механических колебаний звуковой и ультразвуковой частоты. Особенностью таких преобразователей является то, что они позволяют изменять частоту в широких пределах, имеют больший по сравнению с машинными кпд и могут быть выполнены в широком диапазоне мощностей.

В Советском Союзе разработаны и широко используются ультразвуковые генераторы различных мощностей и размеров. Мощность, частота и размеры генератора выбираются в зависимости от его назначения. Например, в ультразвуковых установках, предназначенных для механической обработки твердых сплавов и очистки деталей, нужны генераторы большой мощности (до 10 киловатт), а для медицинских установок ультразвуковой физиотерапии — генераторы сравнительно небольшой мощности (10—20 ватт).

Для промышленных целей в основном широко применяются ультразвуковые генераторы серии УЗГ (УЗГ-2,5М, УЗГ-6М, УЗГ-10М, УЗГ-10У, УЗГ-2-10, УЗГ-10-22 и др.). Они используются в таких технологических процессах, как очистка и обезжиривание перед гальваническими и другими покрытиями, травление и удаление окалины после термообработки, снятие заусениц с деталей, сварка металлов и пластмасс, пропитка электроэлементов и отливок, механическая обработка сверхтвердых и хрупких материалов, дегазация алюминиевых расплавов, ускорение химических процессов, эмульгирование, распыление и т. д. В промышленности применяются также генераторы типов УМ1-4, УМ2-10, УМ2-25, предназначенные для питания ультразвуковых технологических установок.

Научно-исследовательскими и проектно-технологическими организациями созданы новые ультразвуковые генераторы УЗГС-4, УМЗ-2, УЗГ3-1,6, УЗГ5-1,6, УЗГ-1-4, УЗГ-2-4, УЗГ-3-0,4 и др. Они выгодно отличаются от генераторов предшествующих выпусков, так как имеют выдвижные блоки, что обеспечивает свободный доступ к отдельным элементам. Кроме того, у таких генераторов предусмотрена плавная регулировка мощности от 50 до 100 процентов.

В последние годы разработаны и изготовляются ультразвуковые малогабаритные настольные генераторы на полупроводниках мощностью 100—600 ватт. Такие генераторы имеют большую надежность в работе, практически неограниченный срок службы и могут использоваться в различных технологических процессах. Это, например, такие генераторы, как УЗГ4-0,1, УЗГ1-0,4, УЗГ1-0,6 и др.

УЛЬТРАЗВУКОВОЕ РЕЗАНИЕ

Не каждый металл металлом возьмешь. Поэтому туда, где пасуют резцы, сверла и шлифовальные круги, пришли «инструменты» XX века — луч лазера, электрическая искра, ультразвук. Если железо, чугун, сталь можно обрабатывать на токарных, фрезерных, строгальных и других станках, твердые и сверхтвердые сплавы — на электроэрозионных и импульсных станках, то для некоторых сверхтвердых и хрупких материалов эти способы обработки по ряду причин непригодны. Особенно трудно высверливать в таких материалах отверстия да еще сложной формы.

На мысль о возможности ультразвуковой механической обработки сверхтвердых и хрупких материалов натолкнул один из опытов по измельчению абразива. На дне стеклянной банки исследователи заметили углубление. Стали выяснять причину, и оказалось, что оно возникло из-за того, что стержень, которым измельчали абразив, колебался с ультразвуковой частотой.

Стало быть, если под инструмент ультразвукового станка ввести абразивный материал и включить станок, то частицы абразива обрушат на обрабатываемую деталь град ударов. Они начнут долбить деталь, а инструмент станет все больше и больше углубляться в нее. Образно говоря, станок будет действовать по классической схеме: молоток — зубило — металл с той лишь разницей, что станок работает гораздо быстрее, чем рука человека, и роль зубила выполняют крупинки абразива.

Способ ультразвуковой обработки материалов впервые был предложен в 1945 году. Его преимущество состоит в том, что, применяя инструменты различной формы, можно делать не только отверстия, но и сложные вырезы. Он обеспечивает высокую точность — от 50 до 1 мик-

рометра в зависимости от зернистости абразивного материала. Ультразвуковой способ позволяет вырезать оси, нарезать резьбу, изготовлять матрицы, шлифовать, штамповать, клеймить, гравировать и сверлить... алмазы.

Алмаз — самое твердое естественное вещество земли, и сделать в алмазе калиброванное отверстие — целая проблема. Твердость его в 150 раз выше твердости корунда и в 1000 раз выше твердости кварца. Следовательно, при одинаковых условиях один миллиграмм вещества с алмаза сошлифовывается в 1000 раз медленнее, чем с кварца... Не зря греки алмаз называли «адамас», что означает «несокрушимый», а в переводе с латинского «алмаз» — «непреодолимый».

Как же сделать в алмазе отверстия? Первое время это делали так: брали алмазную пудру и, используя ее в качестве абразива, механически сверлили отверстие. Подобная операция тянулась долго и обходилась слишком дорого. Теперь эта проблема решается иначе. Алмаз, как и любой другой сверхтвердый материал, сравнительно легко обрабатывается на ультразвуковом станке. Для этого кристалл алмаза в специальном приспособлении помещают на станине станка. Инструмент укрепляется примерно так, как сверло на сверлильном станке. Да и вращается он, как сверло. Затем включают станок, подводят инструмент к алмазной заготовке и при определенном усилии опускают его в направлении обработки отверстия. Инструмент начинает колебаться с ультразвуковой частотой.

Первые ультразвуковые станки появились в 1953 году. Их наиболее ответственным элементом является акустическая головка, состоящая из трех основных частей: электромеханического преобразователя, концентратора и рабочего инструмента. Правильный расчет всех узлов акустической головки определяет в значительной степени точность и производительность станка.

Ультразвуковой станок получает энергию от лампового генератора, вырабатывающего непрерывный ток ультразвуковой частоты. Ток подается на обмотку электромеханического преобразователя, где электромагнитные колебания превращаются в упругие механические колебания. Затем, усиленные концентратором, они подаются на инструмент, который и воздействует на обрабатываемую деталь. В зону обработки насосом из бака непрерывно под давлением подается абразивная суспензия.

Ультразвуковые станки не сразу заняли в промышленности подобающее место. Мешало этому то, что они поначалу не давали нужной точности. Кроме того, по мере углубления инструмента в материал резко падала производительность. Выдвигалось много различных гипотез для объяснения этого явления, но ни одна из них не была подтверждена опытом.

Исследователи Акустического института Академии наук СССР решили посмотреть — именно посмотреть, своими глазами увидеть,— что же все-таки происходит на самом деле при ультразвуковом резании? Методом высокоскоростной киносъемки (20—50 тысяч кадров в секунду) они сняли весь процесс ультразвуковой обработки стекла. На кинопленке было получено теневое изображение большой контрастности.

Исследование кинопленки показало, что стекло разрушается лишь тогда, когда инструмент наносит прямой удар по частице абразива, лежащей на обрабатываемой поверхности. Казалось бы, чего проще: нужно увеличить силу прижима инструмента к детали, и производительность станка повысится. Об этом же говорили и расчеты, показывавшие, что производительность пропорциональна силе, с которой инструмент прижимают к детали. Чем больше сила, тем больше производительность. Однако на практике все выглядело иначе. Чем больше увеличивали силу прижима, тем медленнее росла производительность. Словно ее сдерживало что-то. Эксперименты продолжались снова и снова. И наконец, победа! Оказывается, просто-напросто надо быстрее обновлять абразивную суспензию, так как при увеличении силы при нажиме абразивные частицы притуплялись и даже вовсе крошились, теряя свои свойства. Было принято решение — нагнетать суспензию в рабочий зазор. Производительность резания повысилась в четыре раза.

Следующим шагом было создание ультразвукового станка с абразивонесущим электролитом. Характерная особенность его в том, что для предварительной обработки деталей совмещены два метода: ультразвуковой и электрохимический, основанный на прохождении тока между электродами через электролит. Чистовая же обработка производится только ультразвуковым методом. Совмещение обоих методов повышает производительность в десять раз. Станок прост в управлении и имеет регулируемый привод подачи головки.

Отечественной промышленностью созданы ультразвуковые станки различного назначения, а следовательно, и различной мощности, которая определяется в зависимости от основного параметра станка — величины обрабатываемой поверхности. Научно-исследовательскими и конструкторскими организациями в свое время была разработана серия ультразвуковых прошивочных станков.

Советские ультразвуковые станки моделей 4773А, 4772А, 4Б772 по своим техническим характеристикам и прежде всего по производительности превосходили зарубежные ультразвуковые станки. Поэтому некоторые капиталистические страны (Япония, Франция) приобрели в СССР лицензии на их производство.

В настоящее время значительно обновился «парк» ультразвуковых станков на основе современных достижений науки и техники в области ультразвука, а также опыта станкостроения. Появилась новая серия ультразвуковых станков: 4А771П, 4Д772, 4Д7722Э, 4Д772ЭМ, 4Д772К, 4Д772ЭК, 4Д772ЭМ, УЗСД-1, МЭ-68, МЭ-76 и др. Во всех этих станках реализованы достижения в области ультразвуковой обработки твердых материалов (системы нагнетания и вакуумного отсоса абразивной суспензии, совмещение ультразвуковой и электрохимической обработки и др.), что позволило значительно повысить производительность, улучшить точность и качество обработки поверхности. В основу новой серии станков положены две универсальные базовые модели, имеющие соответственно мощности генераторов 0,25—0,4 и 1,6—2,5 киловатта.

Ультразвуковой станок 4А771П повышенной точности предназначен для обработки отверстий с точным координатным расположением щелей, фасонных полостей, а также для выполнения граверных работ в деталях из хрупких материалов (стекла, кварца, твердых сплавов, технических камней и т. п.).

Вторая базовая модель — ультразвуковой станок 4Д772, предназначенный для обработки деталей из твердых и хрупких материалов (стекла, ситаллов, кварца, феррита, твердых сплавов). На его базе создан станок 4Д772Э для ультразвуковой и электрохимической обработки, который по конструкции, технологичности, удобству управления и обслуживания, степени механизации находится на уровне лучших образцов ультразвуковых станков отечественного и зарубежного станкостроения.

В музеях многих городов нашей страны, в частности в Ленинградском Эрмитаже, собраны произведения искусства, сделанные из камней-самоцветов. Камнерезы прошлого века работали десятки лет над камнем, чтобы заставить его заговорить живым языком искусства. Иной мастер посвящал любимому делу всю свою жизнь. И это понятно — обработка делалась вручную. В наши дни появились устройства, способные заменить кропотливый труд ювелира. Так ультразвук стал скульптором.

Центральной научно-исследовательской лабораторией камней-самоцветов был создан ультразвуковой полуавтоматический станок УЗСК-80, предназначенный для обработки твердых пород цветного поделочного камня. Преимущества ультразвуковой обработки бесспорны. Если раньше, для того чтобы изготовить художественный барельеф из камня, высококвалифицированные специалисты трудились несколько месяцев, то на ультразвуковом станке на это уходит всего несколько минут. А делается это так. Рисунок художника фотографируется и изготовляется клише. Затем оно крепится к инструменту ультразвукового станка, который переносит рисунок на камень.

Позже сотрудники лаборатории разработали и выпустили новую модель станка УСД-1 с двусторонним действием. Отличается она от прежней тем, что на новом станке преобразователь установлен не вертикально, а горизонтально. Это дает возможность за одинаковое время изготовить не один барельеф, а два.

Одна из последних моделей двустороннего действия — специализированный ультразвуковой станок УЗСД-1. Он предназначен для обработки отверстий и вырезки по контуру деталей массового и серийного производства из камней-самоцветов.

В промышленности нашли также применение специальные ультразвуковые станки для обработки алмазов, в частности алмазных волок (МЭ-22, МЭ-32, МЭ-34). На базе станка МЭ-22 создан более совершенный ультразвуковой станок МЭ-76, предназначенный для обработки и восстановления твердосплавных и алмазных фильер. Разработаны специализированные ультразвуковые станки с вращающимся алмазным инструментом. Такие станки открывают большие возможности в области изготовления глухих глубоких и точных отверстий, а также фасонных пазов в деталях из хрупких труднообрабатываемых ма-

териалов (керамики, карбида урана, двуокиси урана, диоксида тория, бериллиевой керамики и т. п.). Это станок модели МЭ-77 и созданный на его базе более совершенный МЭ-332.

В Советском Союзе разработан принципиально новый способ ультразвуковой обработки твердых и хрупких материалов. Вольфрамовая проволока, хорошо знакомая нам как излучатель света в электрических лампочках, приобрела новую «профессию». Ее применили в качестве режущего инструмента для обработки хрупких природных и искусственных материалов. Вольфрамовая нить, приводимая в движение ультразвуковым преобразователем, вырезает прямолинейные и криволинейные щели, пазы шириной в несколько долей миллиметра на любую глубину. Новому «резаку» поддаются прочные материалы — сапфир, рубин, кварц, ситаллы. Можно обрабатывать также стекло, керамику, полупроводниковые материалы. При этом обработка производится с безупречно ювелирной чистотой.

Новым направлением в механической обработке материалов и деталей с помощью ультразвука считается также обработка свободным абразивом при ненаправленном воздействии ультразвука. Эта технология внедрена на ряде производств, где в массовом количестве изготовляются мелкие прецизионные детали. Ультразвуковая установка, работающая под повышенным статическим давлением, разрешила нелегкую задачу «чистовой» доводки деталей, то есть удаления с них заусениц, остающихся после основной операции. В дальнейшем в эту технологию внесли существенные изменения. Применили суспензию (моющий состав со взвесью из очень мелких — всего в несколько микрометров — частиц абразива), благодаря чему скорость разрушения заусениц еще больше увеличилась. Для этой цели созданы установки УЗВД-8, УСК-2 и др.

Область применения ультразвука при механической обработке материалов и деталей непрерывно расширяется и совершенствуется. Так, например, ультразвук стали использовать для очистки шлифовальных кругов, обработки инструментов шаржированным абразивом, для интенсификации электроэрозионной обработки, снижения усилия при механической обработке и пластической деформации.

СНИЖЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ УСИЛИЙ ПРИ ОБРАБОТКЕ РЕЖУЩИМ ИНСТРУМЕНТОМ

Металлообработчики знают, как трудно поддаются обработке обычными методами многие современные материалы, в особенности вязкие и жаропрочные сплавы, сплавы на никелевой основе, обладающие повышенной прочностью, и т. д. А что если в систему «станок—инструмент—деталь» ввести еще одно звено — излучатель ультразвука? Исследователи установили, что в этом случае процесс обработки значительно облегчается.

Ультразвук стали применять для снижения сил резания при токарной, фрезерной, строгальной обработке, сверлении, зенковании, нарезании резьбы и шлифовании. Снижение сил с помощью ультразвука позволило значительно повысить производительность, получить более высокий класс чистоты обработки, увеличить срок службы режущих инструментов.

Наложение ультразвуковых колебаний на режущий инструмент при обработке хрупких и особенно вязких материалов существенно влияет на процесс резания. При этом силы резания значительно уменьшаются, а шероховатость обработанной поверхности снижается. Эффективность воздействия ультразвуковых колебаний в процессах резания зависит от величины амплитуды и частоты колебаний, их направления, физико-механических и теплофизических свойств обрабатываемого материала и материала инструмента.

Влияние ультразвуковых колебаний на процессы сверления, зенкования и развертывания еще недостаточно изучено. Однако при вибрационном сверлении меди, алюминиевых сплавов и нержавеющей стали производительность повышается. Кроме того, легче дробится стружка и меньше налипание на рабочих поверхностях инструмента. Более эффективное воздействие на процессы сверления, зенкования и развертывания оказывают крутильные колебания, совпадающие с направлением главного движения.

Большие трудности возникают при нарезании резьбы в вязких материалах. Метчик заедает, защемляется, а часто и вовсе ломается. Приходится и инструмент и деталь выбрасывать. Для устранения этих недостатков

метчику одновременно с обычным движением (вращательное вокруг оси и поступательное вдоль оси) сообщили дополнительное высокочастотное колебательное движение с ультразвуковой частотой в осевом направлении. Оно намного снизило крутящий момент и силу трения на боковых гранях режущей части инструмента. Теперь он совсем не защемляется, и значительно снижается усилие резания. Такие метчики применяются в специальных ультразвуковых резьбонарезных станках УЗР-2А125, УЗР4-2А125, УЗР-2118, УЗР-2А53, УЗР-2А56 и др. для нарезания внутренних резьб на деталях из труднообрабатываемых вязких материалов.

В последние годы созданы новые ультразвуковые резьбонарезные станки СРС-2, СРС-3 и СРС-901. Они конструктивно во многом сходны, унифицированы. Станки снабжены ультразвуковыми преобразователями из пьезокерамики ЦТС-19, которые не требуют водяного охлаждения, компактны и имеют малую массу.

Ленинградские специалисты нашли еще одно удачное решение. Они разработали достаточно простую конструкцию ультразвуковой головки М2-М5, предназначенную для нанесения мелкоразмерной резьбы с высокой точностью на деталях из мягких сплавов. Головка состоит из колодки, щетки, коллектора и колебательной системы. Она навешивается на шпиндель обычного резьбонарезного или сверлильного станка и работает со стандартными метчиками.

Применение ультразвука при обработке твердых материалов продолжает расширяться. Его можно использовать в кузнечно-штамповочном, прокатном, волочильном и других производствах. Правда, здесь предстоит еще большая экспериментальная работа, но первые результаты ее обнадеживающие. Так, например, установлено, что при изготовлении проволоки ультразвуковые колебания снижают усилие волочения на 60 процентов.

Изделия из материалов с особыми физико-химическими свойствами получают прокаткой в вакууме при высокой температуре. Но из-за повышенного коэффициента трения на валки быстро налипает металл, что порой делает процесс невозможным. В Белорусском политехническом институте под руководством академика БССР В. П. Северденко разработан прокатный стан, валки которого колеблются с ультразвуковой частотой в направлении, параллельном осям их вращения. Благодаря

этому усилия деформации снижаются в 1,5—2 раза, а вытяжка, то есть степень деформации, увеличивается на 20—50 процентов. Кроме того, резко уменьшается контактное трение.

При наложении ультразвуковых колебаний металл становится более податливым без дополнительного повышения температуры, повышается его эластичность, снижается усилие прокатки. Применение ультразвуковых колебаний в стане позволило прокатывать хрупкие материалы, чего нельзя было делать в обычных условиях. На ультразвуковом стане можно прокатать более тонкую полосу, чем на обычном стане с таким же диаметром валков. Осевые перемещения валков заглаживают неровности на поверхности прокатываемого металла, в результате чего чистота обработки повышается на 1,5—2 класса.

Казалось, что уже исчерпаны все возможности интенсификации процесса волочения труб из полых стальных заготовок. Малейшее увеличение скорости протяжки — и сталь неизменно рвется. Инженеры Первоуральского новотрубного завода решили эту проблему. Они сообщили металлу через фильеру ультразвуковые колебания, что повысило его пластичность. Из заготовки диаметром 25 миллиметров стали получать 40-миллиметровую трубу за один цикл вместо 3—4 протяжек обычным способом. Применение ультразвука повысило производительность на 25 процентов.

Появились и другие области применения ультразвука. Есть такой метод упрочения стальных деталей и инструментов — поверхностная пластическая деформация. Сущность его в том, что рабочую поверхность детали обрабатывают наклепом, накатом или еще каким-либо способом. Машиностроители заставили ультразвук выполнять эту работу. В специальном станке стальной или твердосплавной шарик с ультразвуковой частотой бьет по обрабатываемой детали и одновременно с этим прижимается к поверхности под постоянным давлением, то есть производит тот же наклеп, только гораздо быстрее. А если вместо шарика установить плоскую пластину? Получим новое явление — мгновенное полирование. Это установили ученые и инженеры Акустического института Академии наук СССР и Всесоюзного научно-исследовательского института электросварочного оборудования.

Ультразвук полирует мгновенно. Зеркальная чистота поверхности достигается за 0,1—0,2 секунды, и, что уди-

вительно, обрабатывающий инструмент и заготовка плотно прижаты и не перемещаются друг относительно друга. В то время как обычная полировка проводится на быстроходных полировальных станках с эластичными кругами из кожи, фетра, войлока, сукна и т. п. На эти круги наносят разные порошки или полировальные пасты. Процесс полировки трудоемкий и длительный.

Сравнительно недавно наметилась новая перспективная область ультразвуковой технологии — шлифование и доводка режущего инструмента. Этим способом можно обрабатывать детали больших размеров с повышенной чистотой обработки.

Государственным научно-исследовательским институтом кварцевого стекла совместно со специальным проектно-конструкторским и технологическим бюро электрообработки разработан ультразвуковой станок ЛЭ-402, предназначенный для среднего и тонкого шлифования жаропрочных сплавов.

На заводе «Ростсельмаш» разработана, изготовлена и внедрена ультразвуковая установка для доводки режущего инструмента. Работа установки основана на том, что инструмент перемещается относительно концентратора при горизонтальном расположении магнитострикционной головки. При доводке исключены завалы режущих кромок. Чистота доведенной поверхности инструмента соответствует 8—10-му классу. Значительно повысилась стойкость режущего инструмента, работающего на повышенных оборотах.

Разрушение деталей машин и приборов обычно начинается с поверхностного слоя. Высокие эксплуатационные свойства деталей, их надежность и долговечность в значительной степени определяются качеством поверхностного слоя. В промышленности нашли широкое применение упрочняюще-чистовые методы обработки деталей поверхностным пластическим деформированием. Один из таких методов — алмазное выглаживание, которое оказалось перспективным при повышении стойкости режущего инструмента.

Абразивно-алмазные круги шлифовальных и заточных станков из-за засаливания рабочих поверхностей постепенно выходят из строя. Для борьбы с этим явлением советские конструкторы предложили оригинальную ультразвуковую установку ЛЭ-403.

УЛЬТРАЗВУКОВАЯ ОЧИСТКА

Люди придумали множество способов очистки поверхностей от различных загрязнений. Теперь к ним добавился ультразвуковой.

Ультразвуковая очистка либо заменяет, либо дополняет традиционные очистные способы и методы — от ручных операций с применением различных растворов до струйных моечных автоматов.

Одним из основных преимуществ ультразвуковой очистки перед другими способами является ее высокое качество, кроме того, стало гораздо легче очищать детали, имеющие сложную форму, труднодоступные места, узкие щели, маленькие отверстия и полости. Ультразвуковая очистка высокопроизводительна и допускает замену огнеопасных или дорогостоящих органических растворителей водными растворами щелочных солей, жидким фреоном и другими менее опасными и более дешевыми веществами.

Чем объяснить высокую эффективность ультразвуковой очистки? Ответ на этот вопрос связан с очень интересным физическим явлением, называемым кавитацией (латинское cavitas — «пустота»).

Теоретически о существовании этого явления знали с тех пор, как петербургский академик Леонард Эйлер обосновал возможность образования в жидкости разрывов (пустот) вследствие локального понижения давления с последующим захлопыванием возникших полостей. Эйлер предсказал кавитацию, ни разу не наблюдая ее.

Практически с кавитацией столкнулись много позже, в прошлом веке, когда на кораблях вместо боковых гребных колес появились винты, вращающиеся с большой скоростью. Капитаны стали замечать, что скорость их судов с течением времени постепенно падает без видимых на то причин. Но причина была, и достаточно видимая. Когда осмотрели винт одного из кораблей, поставленных в док на ремонт, увидели, что его лопасти похожи на лепестки, изъеденные гусеницами. Этим явлением, естественно, заинтересовались и стали его изучать. Судостроителей, а также создателей гидротурбин беспокоила прежде всего одна мысль: как бороться с этим грозным и неумолимым врагом, как уберечь лопасти винтов и турбин от разрушающего воздействия облака кавитационных пузырьков, которое, как было установлено, образуется

на границе «жидкость — твердое тело» при определенных условиях и определенном режиме работы.

Ну а нас кавитация в данном случае интересует с другой стороны — не как враг, а как... друг. Этот парадокс возник сравнительно недавно — с того времени, когда стали изучать ультразвук и разрабатывать технологию ультразвуковой очистки.

Кавитационные пузырьки возникают не только при вращении винтов и турбин. Они появляются, если в жидкость излучать ультразвуковые колебания. Кавитацию, возникающую под воздействием ультразвуковых колебаний, иногда называют ультразвуковой кавитацией. Ультразвуковые колебания образуют в жидкости чередующиеся в соответствии с частотой области высоких и низких давлений. В разреженной зоне гидростатическое давление понижается до такой степени, что силы, действующие на молекулы жидкости, становятся больше сил межмолекулярного сцепления. В результате резкого изменения гидростатического равновесия жидкость как бы разрывается, порождая многочисленные мельчайшие пузырьки газов и паров, находящиеся до этого в жидкости в растворенном состоянии. В следующий момент, когда в жидкости наступает период высокого давления, образовавшиеся ранее пузырьки «захлопываются». Возникают ударные волны с очень большим местным мгновенным давлением, достигающим нескольких сотен атмосфер. Вот эти бесчисленные микровзрывы кавитационных пузырьков и отдирают с поверхности обрабатываемой детали грязь, жиры, окалину и нередко даже ржавчину.

Возникновение кавитации легко обнаружить по туманному облачку в ультразвуковом поле. При больших интенсивностях кавитации возникает шум, напоминающий шипение закипающего чайника.

Ультразвуковая кавитация уже давно стала основным фактором, способствующим ускорению многих технологических процессов, особенно в процессах очистки, а также в химической и металлургической промышленности. Но очень важно уметь управлять кавитационным процессом. Ультразвуковая кавитация в жидкости зависит от ее плотности, вязкости, температуры, молекулярной массы, сжимаемости, содержания газов, наличия микроскопических включений, частоты и интенсивности ультразвуковых колебаний, статического давления и других факторов. Так, например, в воде кавитация сильнее, чем

в других жидкостях. Газ в жидкости повышает эффективность кавитационных явлений. С увеличением температуры жидкости интенсивность кавитации растет до определенного максимума, пройдя который она начинает падать. Эффективность кавитации повышается при увеличении мощности, но понижается с ростом частоты ультразвуковых колебаний. При очень высоких ультразвуковых частотах кавитацию вообще невозможно получить.

Ученые довольно детально разработали технологию ультразвуковой очистки, которая стала очень распространенной и незаменимой в различных отраслях промышленности. В последние годы возникло направление, получившее название высокоамплитудной ультразвуковой очистки. Характерной особенностью ее является существенное увеличение амплитуды колебаний излучателя и как следствие изменение энергетических характеристик излучения — изменение акустических и кавитационных параметров технологической жидкости.

Ультразвук очищает самые разнообразные металлические, стеклянные, керамические и другие детали. Так, например, кольца подшипников легко очищаются от полировочной пасты, печатные платы — от флюса, детали и прокат жести — от термической окалины, оптические детали и драгоценные камни — от полировочных веществ, мелкие детали — от заусениц, медицинский инструмент, стеклянную тару — от различных загрязнений и т. д.

Особенно тщательная очистка нужна для деталей быстровращающихся устройств, подшипников, электрических контактов, реле, топливной аппаратуры, а также деталей электронной, вычислительной техники, часовых механизмов, оптических приборов и т. д. Высококачественная очистка деталей от загрязнений занимает важное место в современной технологии массового производства.

Вот некоторые примеры ультразвуковой очистки. На Челябинском и других тракторных заводах применялась ультразвуковая очистка деталей топливного насоса. Ультразвуковая установка показала хорошие результаты, позволила заменить трудоемкую ручную промывку, повысить качество очистки и улучшить условия труда.

Чтобы очистить офсетную печатную форму, ее погружали в щелочь, потом мыли волосяной щеткой под струей воды. На это уходило много времени. Кроме того, рабочий дышал вредными парами. Когда применили ультразвук, форму стали очищать за несколько минут. Уст-

ройство, которое придумали конструкторы, состоит из двух ванн. В одной из них с помощью ультразвука с фольги удаляют старое изображение, в другой смывают с нее оставшиеся щелочь и грязь.

В тростильно-крутильных цехах чистильщиц машин не так давно узнавали по рукам — вечно распаренные, в морщинах. И все оттого, что работницы ежедневно промывали в горячей воде кольцевые и нитеразделительные планки машин мокрого кручения. А когда вступила в строй ультразвуковая установка для очистки пленок, эту операцию стали выполнять всего три человека вместо 16. И труд стал иным. Не моют, как прежде, а лишь навешивают грязные и снимают чистые пленки.

На Одесском заводе бактериальных препаратов совместно с кафедрой физики Одесского политехнического института разработан и внедрен ультразвуковой метод мойки ампул. Раньше почти 80 процентов их при очистке шло в брак. Теперь ультразвуковые колебания ускоряют процесс мойки, резко улучшают качество очистки. Быстро разрушаются все загрязнения, легко отделяются осколки стекла. Ультразвук отмывает ампулы до блеска. Значительно сокращен процент брака.

На Горьковском автозаводе тоже внедрили ультразвуковую установку. Она предназначена для очистки картеров автомобилей от графитовой смазки и масла. Установка состоит из шести ультразвуковых генераторов и двух ванн, в каждую из которых вмонтировано восемь магнитострикционных преобразователей. Применение установки позволило в несколько раз повысить производительность труда и сэкономить около девяти тысяч рублей в год.

Замечательного помощника получили металлурги. Всего пять минут требуется ультразвуку для очистки после проката одного километра стальной ленты. Несмотря на огромную скорость, процесс выполняется бесшумно. Качество очистки высокое, а расход химических материалов уменьшился вчетверо.

Очистка от загрязнений труб и трубопроводов — извечная и большая проблема. Трудность состоит в том, что трубы имеют большие размеры и сложные переплетения. В Советском Союзе разработан и запатентован в ряде стран способ ультразвуковой очистки труб любой конфигурации и любой загрязненности. Этим способом можно очищать наружную и внутреннюю поверхности

трубопроводов различной длины и диаметра с неограниченным количеством изгибов.

На механических, оптических, часовых и других заводах начали успешно применять метод ультразвуковой очистки для снятия заусениц. Мелкие детали загружают в ванну с водным раствором абразива. При включении установки жидкость в ванне «вскипает», а под воздействием зерен абразива острые кромки деталей закругляются. Радиус закругления не превышает 3—5 микрон. При ультразвуковом методе обработки деталей производительность стала намного выше, чем раньше.

Хлопкоуборочный агрегат имеет более ста шпинделей. От состояния этих деталей во многом зависит производительность машины и качество собранного хлопка. При работе на шпинделях образуется вредоносный налет. Очищать их очень трудно и долго. Эту работу сейчас выполняет полуавтоматическая ультразвуковая установка, созданная Всесоюзным научно-исследовательским институтом технологии машиностроения.

В настоящее время, в век радиоэлектроники и ракетной техники, надежность радиоаппаратуры имеет огромное значение. Замена электровакуумных приборов полупроводниковыми значительно повышает их надежность. Но это длительный процесс, и «старушкам»-радиолампам еще придется изрядно потрудиться, несмотря на то что они часто «подводят» нас. Ученые установили, что радиолампа будет служить в полтора раза дольше, если в процессе производства ее детали очистить с помощью ультразвука.

Промышленные установки для очистки радиодеталей впервые в нашей стране созданы Всесоюзным научно-исследовательским институтом токов высокой частоты имени В. П. Вологдина. Процесс очистки ускоряется в отдельных случаях в сотни раз, при этом достигается такая чистота поверхности, о которой можно лишь мечтать при всех других способах. Специалисты Рижского центрального проектно-конструкторского бюро механизации и автоматизации заменили ручную очистку ячеек памяти ЭВМ от загрязнений ультразвуковой. Детали, установленные в специальных кассетах (по 120—150 штук), погружаются в ультразвуковую ванну, где и очищаются. Трудоемкость снижается почти в шесть раз.

Прекрасные статуи Венеции изъедены «черной оспой» — так называют жители этого города страшные сле-

ды, которые оставляют на мраморе дым и копоть — бич большого современного города. Главный хранитель венецианских памятников, посоветовавшись с учеными и инженерами, организовал работы по очистке мрамора с помощью ультразвука. В отличие от пескоструйного способа ультразвуковой не причиняет никакого вреда мрамору, а скорость и качество очистки высокие. Ученые считают, что ультразвук поможет сохранить уникальные памятники истории.

При частой демонстрации фильмов киноленты изнашиваются, загрязняются и в конце концов приходят в негодность. Специалисты научились реставрировать ленты, возвращая им прежнюю «молодость». Но прежде чем начинать реставрацию, киноленту нужно хорошо промыть, а это не так просто. Недавно некоторые конторы кинопроката получили совершенные ультразвуковые машины для очистки различных типов кинолент. Они применяются у нас впервые.

Ультразвуковой метод можно применить для стирки тканей, особенно шерсти. Обычно шерсть сильно загрязнена жиром и другими органическими веществами. Мыльные и щелочные растворы ухудшают качество волокна. При ультразвуковой стирке применяются нейтральные растворы, сохраняющие качество волокна. Кроме того, ультразвуковая мойка способствует уничтожению различных микроорганизмов, находящихся в немытой шерсти. Применение ультразвуковых машин особенно эффективно для стирки грубых, сильно загрязненных вещей, когда обычная стирка малопригодна.

Одна из японских фирм разработала ультразвуковую стиральную машину, которую можно использовать как домашнюю ванну. Человеку, сидящему в ней, не нужно делать никаких движений: машина сама вымоет его, притом за очень короткое время. Неизвестно, правда, насколько такая мойка полезна для здоровья,— реклама об этом умалчивает.

Там же, в Японии, по сообщению еженедельника «За рубежом», изобретена стиральная машина, которая не требует мыла и других моющих средств. Вода в бачке машины с помощью специального насоса насыщается воздушными пузырьками, они и удаляют с ткани грязь. Использованную один раз воду можно применять вторично, пропустив ее через фильтр. В машине нет отжимной цент-

рифуги, поэтому белье при стирке в ней меньше изнашивается.

Судя по всему, процесс стирки в этой машине основан на явлении ультразвуковой кавитации.

При движении жидкости по трубопроводу в нее довольно часто попадают пузырьки воздуха или какого-либо газа. Это увеличивает сопротивление движению жидкости и уменьшает скорость подачи продукта. В Физико-техническом институте Академии наук Белоруссии под руководством академика АН БССР Е. Коновалова разработан метод очистки жидкости от газов в трубопроводах. Он основан на создании интенсивного ультразвукового поля на одном из участков потока. Под воздействием ультразвука пузырьки сталкиваются, сливаются, укрупняются и всплывают.

Перечисленные примеры — далеко не полный перечень технологических возможностей ультразвука, уже, кстати, в большинстве своем реализованных в многочисленных установках, агрегатах и устройствах. Это ванны типа УЗВ и др. Многие ультразвуковые ванны, агрегаты, установки внедрены в производство и дали значительный экономический эффект.

Ультразвук применяют и для других видов очистки, основанных на иных физических принципах действия. Одна из серьезных сегодняшних технических проблем — очищение загрязненного воздуха от пыли, дыма, копоти, тумана, окислов металлов и т. п. Мельчайшие частицы этих веществ из заводских фабричных труб устремляются вверх, а потом разносятся ветром на большие расстояния. Например, по серому налету на листьях деревьев и на окружающих предметах нетрудно догадаться, что в данном районе находится цементный завод. Тысячи тонн цемента теряют заводы в виде распыленных мельчайших частиц при обжиге. То же самое происходит и на химических, алебастровых, сажегазовых и других предприятиях.

Разрешима ли вообще эта проблема? С давних пор уже пользуются пылеулавливающими устройствами, действие которых основано на различных принципах. Это пылеосадочные камеры, ротационные пылеулавливатели, центробежные уловители, электрофильтры и т. д. Однако все эти устройства громоздки и не всегда достаточно эффективны. Поэтому ученые продолжают искать новые пути ускорения и повышения качества очистки воздуха от газа и загрязнения.

В Польше в 1967 году состоялся международный симпозиум по проблеме уменьшения загрязненности воздушной среды. Некоторые ученые в своих докладах отмечали перспективность ультразвукового метода очистки воздуха, так как он обладает многими положительными качествами. Он не зависит от температуры и влажности среды, легко поддается автоматизации, ультразвуковые устройства просты в эксплуатации.

Для борьбы с загрязнениями изобретено оригинальное приспособление, осаждающее пыль. Действие его основано на способности звуковых и, в частности, ультразвуковых волн влиять на мельчайшие частицы пыли. Поэтому если оборудовать заводские трубы ультразвуковыми сиренами, то они будут воздействовать на твердые частицы дыма, осаждать в определенных местах и препятствовать их распространению.

В чем сущность ультразвуковой очистки воздуха? Пылинки, которые беспорядочно летают в воздухе, под действием ультразвуковых колебаний чаще и сильнее ударяются друг о друга. В результате они слипаются и увеличиваются в размере. Процесс укрупнения частиц называется коагуляцией. Укрупненные частицы быстрее оседают, легче улавливаются обычными фильтрами и, стало быть, полнее очищается воздух.

Ультразвуковые методы очистки воздуха от загрязнения внедряются сейчас во многие отрасли промышленности и постоянно совершенствуются. Специалисты считают, что необходимо создание многоступенчатых ультразвуковых осадителей пыли, а также мощных, но экономичных источников питания. Дело в том, что у имеющихся сейчас акустических пылеуловителей есть серьезный недостаток — относительно большой расход электроэнергии. Поэтому акустические пылеуловители применяют пока в основном для улавливания очень ценной и тонкой пыли, например, на свинцовых и бронзоплавильных заводах.

Явление коагуляции с успехом может быть использовано в борьбе с туманами, доставляющими немало забот и неприятностей аэродромной службе, летчикам и морякам. Сколько раз туман был виновником аварий и катастроф! Десятилетиями ученые искали эффективные средства для рассеивания тумана. Некоторые из них уже применяются в районах аэродромов. А как быть на море или в океане, где судно может попасть в зону тумана на нес-

колько дней? Опыты показали, что в данном случае может эффективно помочь ультразвуковая сирена, она в состоянии рассеять туман на расстояние 300—400 метров. Такую сирену, но меньших размеров, можно установить и на автомобиле.

Известно, какую большую трудность представляет очистка паровых котлов и теплообменных аппаратов от накипи, ухудшающей их теплопроводность. В теплообменных аппаратах слой накипи достигает 12—15 миллиметров, что приводит к перерасходу топлива до 10 процентов. Наилучшее решение проблемы в том, чтобы не допускать образования накипи. Эту роль и выполнил ультразвуковой излучатель, вмонтированный в корпус парового котла. Настроенный на определенный режим работы, он либо непрерывно, либо через некоторые промежутки времени как бы встряхивает «содержимое» котла, не давая твердым частицам откладываться на его стенках.

Для той же цели ультразвуковой излучатель применяют в сахарной промышленности, где серьезную проблему представляет предотвращение образования накипи в теплообменных аппаратах. К особенно тяжелым последствиям приводит накипеобразование на выпарной станции — одном из важнейших участков сахарного завода. Расчеты показали, что от накипеобразования потери в сахарной промышленности страны равны продукции десятков заводов средней мощности, работающих в течение трех месяцев. Введение ультразвуковых колебаний в тепловые аппараты предупреждает образование накипи.

Для предотвращения накипеобразования создано несколько промышленных приборов (УЗГИ-12, ИГ-67, АУР, УЗТИ-2, ИГУР-6). Принцип действия их одинаков. Генераторы собраны на полупроводниках. Приборы просты по устройству, надежны в эксплуатации, не имеют органов регулировки и настройки, рассчитаны на непрерывную круглосуточную работу. Приборы применяются в теплообменной аппаратуре: паровых котлах, бойлерах, решоферах и корпусах выпарки сахарных заводов, холодильниках и т. д.

При правильной эксплуатации импульсных ультразвуковых генераторов и при поддержании нормальных водно-химического режима и щелочности воды новой накипи в котлах не образуется. Старая накипь в течение двух-трех месяцев отслаивается и выпадает в осадок, а

на теплопередающих поверхностях наблюдаются лишь шламовые отложения, легко смываемые струей воды во время профилактических осмотров.

А вот еще один оригинальный пример. Ученые Одессы испытали ультразвуковой метод очистки судов от ракушек и водорослей. Эти на первый взгляд безобидные существа, облюбовавшие днища кораблей для своих поселений, на самом деле не так уж безобидны: они «крадут» у судна изрядную долю его скорости. Механическая очистка — чрезвычайно трудоемкая операция, а главное, для этого судно надо ставить в док, то есть на какое-то время выводить его из эксплуатации. В свое время в печати появилось сообщение о том, что днище судна Черноморского пароходства «Хирург Вишневский», обработанное ультразвуком, и через 15 месяцев плавания было чистым от непрошенных «гостей».

УЛЬТРАЗВУКОВАЯ СВАРКА

Как сварить два тончайших лепестка фольги или приварить волосок проволоки к металлической детали? О дуговой сварке не может быть и речи: от малейшего нагрева лепестки закрутятся и сгорят. И многие другие способы здесь непригодны. А как соединить пластмассы — шурупами, скобами? А если требуется неразъемное соединение? Ведь не все детали можно отштамповать, многие узлы приходится собирать. С этим прекрасно справляется ультразвук.

Метод ультразвуковой сварки появился сравнительно недавно, и поэтому ультразвуковая сварка — это новый технологический способ соединения материалов, занимающий промежуточное положение между сваркой и сваркой давлением.

Ультразвуковая сварка — это холодная сварка, которая производится при температуре значительно ниже температуры плавления, поэтому соединение происходит в твердом состоянии. Такая сварка не имеет свойств и структуры свариваемых материалов, а это очень важно, когда нужно сварить между собой изделия из таких металлов, как молибден, цирконий, ниобий, тантал и др.

Окончательного представления о механизме образования соединений при ультразвуковой сварке пока нет. Одни исследователи утверждают, что соединения с помощью

ультразвука возникают в результате образования «узлов схватывания». Проще говоря, под одновременным действием двух сил (прижимающей и вибрирующей) одна деталь как бы «втирается» в другую. Другие полагают, что сварка происходит в результате нагрева поверхностного слоя трущихся друг о друга с ультразвуковой частотой деталей.

Ученые Московского высшего технического училища имени Н. Э. Баумана (МВТУ), Московского энергетического института и Института металлургии имени А. А. Байкова применили ультразвук для сварки различных материалов. Соединение происходит без существенного нагрева, что облегчает сварку пластмасс и тех металлов, которые в расплавленном состоянии активно взаимодействуют с кислородом.

С помощью ультразвуковой сварки можно соединять тонкие листы, приваривать спиральные ребра к стержням, гофрированные листы к гладким, сваривать миниатюрные детали приборов. И все это производится без специальной зачистки поверхности, что делает ультразвуковую сварку незаменимой в радиоэлектронной и приборостроительной промышленности. Лучшие результаты получены при сварке алюминия и его сплавов. Ультразвуковая сварка может выполняться точечным и шовным методами.

Большое место ультразвуковая сварка занимает в радиоэлектронике (ультразвуковая микросварка). Она имеет ряд преимуществ по сравнению с другими методами сварки при изготовлении полупроводниковых приборов в микросхемах. На практике ультразвук начали применять и при обычной электрической сварке. Зачастую швы бывают пористыми, неоднородными, а следовательно, непрочными. Качество шва зависит от многих причин: опыта электросварщика, электродов, величины тока в цепи и др. Особенно высоки требования к сварочным швам, когда нужно получить герметичность или сварить детали, которые будут работать с большими перегрузками. В принципе идея ультразвуковой обработки расплавленного металла была не новой. Металлурги уже это делали и получали металлы без раковин, пор и значительно мелкозернистее, чем в том случае, если он остывал без предварительной ультразвуковой обработки. Тот же эффект получается, если сварку сопровождать ультразвуковым облучением.

Для сварки металлов создана серия отечественных ультразвуковых сварочных машин и аппаратов (УЗСМ-1, УЗСМ-2, УЗСМ-3, УЗСА-4, УЗСА-5, УСФ-45), а также пистолетов (УЗСП-6, УЗСП2-0,2С).

Значительное место ультразвуковая сварка занимает при соединении пластмасс и полимерных материалов. Разработанный в нашей стране метод ультразвуковой сварки позволяет сваривать термопласты толщиной от нескольких микрон до 10 миллиметров и более. Причем так же, как и при сварке металлов, учитывается толщина только той детали, которая расположена со стороны сваривающего инструмента. Ультразвуковая сварка пластмасс происходит под некоторым давлением при вводе в свариваемые детали ультразвуковых колебаний.

Ультразвуковая сварка полиэтиленовых тубов, коробок, банок, помимо того что обеспечивает необыкновенную прочность, одновременно стерилизует содержимое упаковки. Колебания высокой частоты убивают микробов. В лаборатории новых методов сварки МВТУ проделали следующий эксперимент. В полиэтиленовом тубе заварили с помощью ультразвука обычную воду. Через несколько месяцев туб вскрыли, оказалось, что вода такая же свежая, словно ее только что налили из водопровода. Это свойство ультразвуковой сварки использовали работники пищевой промышленности. На рыбоконсервных предприятиях Мурманска, Риги, Ленинграда и других портовых городов внедрены полуавтоматические установки для упаковки рыбных продуктов в полиэтиленовую тару. Ранее для этой цели применялась дефицитная алюминиевая жесть. Замена ее на пластические материалы уже дала сотни тысяч рублей экономии.

Метод ультразвуковой сварки пластмасс привлекает все большее внимание инженеров и технологов, поскольку он легко поддается автоматизации, по производительности не уступает сварке токами высокой частоты, а по количеству видов пластмасс, которые могут быть сварены, значительно превосходит его. Ультразвуком легко свариваются полиэтилен, полистирол, капрон, стеклопластик и другие пластмассы.

Ультразвуковая сварка пластмасс выгодно отличается от всех других способов сварки тем, что ультразвуком можно сваривать даже загрязненные детали. Поэтому ультразвуковая сварка успешно применяется для герметизации пластмассовых упаковок пищевых продуктов, а

также лакокрасочных, горючих и смазочных материалов. Она удобна и безопасна при упаковке легковоспламеняющихся продуктов и взрывчатых веществ: ведь разогрев деталей при ультразвуковой сварке происходит только в месте их контакта. Изделия из полимеров со сложной конфигурацией шва, сваренные с помощью ультразвука, проверили на прочность, и оказалось, что прочность соединений равна прочности основного материала. А при испытании сварных образцов на сдвиг чаще разрушался основной материал около шва.

Ультразвуковые сварочные машины находят все большее применение в промышленности. Так, на Московском заводе плавленых сыров создана автоматическая линия, на которой пластмассовые тубы заполняют сыром и заваривают с помощью ультразвуковой сварочной машины. На Московском заводе малолитражных автомобилей ультразвуковую сварочную машину применили для сварки некоторых пластмассовых деталей автомобиля «Москвич».

Для сварки изделий из большинства термопластичных материалов Всесоюзным научно-исследовательским институтом технологии машиностроения разработана серия ультразвуковых сварочных аппаратов типа УЗАП, которые применяются в различных областях промышленности. Эти аппараты производят сварку внахлестку по всей плоскости касания сварочного инструмента.

Всесоюзным научно-исследовательским институтом электросварочного оборудования (ВНИИЭСО) созданы ультразвуковые сварочные машины МТУ-0,4, МТУ-0,4-3, МТУ-0,4-4, КТУ-1,5, АУС-1,5. Машина МТУ-0,4-4 предназначена для сварки пластмасс и металлов. Она может быть использована при изготовлении различных радиотехнических, электротехнических изделий крупносерийного производства, например для сварки корпусов микродвигателей, конденсаторов, аккумуляторов, магнитофонов, кассет, светильников, фильтров, игрушек.

Одним из основных атрибутов портняжной профессии до сих пор еще остается иголка с ниткой. Но для соединения тончайших и ажурных, как паутинка, тканей из капрона, нейлона, орлона, терилона нужны нитки, по сравнению с которыми человеческий волос кажется канатом. При ультразвуковом шитье нитки, естественно, не нужны.

Безниточная швейная машина уже создана Всесоюзным научно-исследовательским институтом легкого и текстильного машиностроения. Внешне она мало чем отличается от обычной, но у нее вместо иглы специальный наконечник, швея нажимает на педаль, включается генератор ультразвука, и наконечник, излучая ультразвуковые волны, проходит по ткани, успевая за считанные доли секунды надежно ее скрепить. В зависимости от формы наконечника швы на изделиях могут быть различных конфигураций. На этой машине можно сшить любое изделие из синтетической ткани. Теперь работнице не нужно тратить время на наматывание и обрез нитки, не понадобятся также сотни тысяч катушек и миллионы километров ниток.

Ультразвуковые швейные машины открывают большие возможности для автоматизации швейного производства. Немаловажно и другое преимущество этого метода. Известно, что в пошивочном цехе швейной фабрики с обычной технологией стоит непрерывный шум. А в таком же цехе с ультразвуковыми машинами будет абсолютная тишина, если не считать шороха тканей.

УЛЬТРАЗВУКОВАЯ ПАЙКА И ЛУЖЕНИЕ

Для создания летательных аппаратов и многих других приборов конструкторы вынуждены применять легкие, но прочные материалы. К ним относится алюминий и его сплавы, обладающие, кроме прочности, высокими электропроводными свойствами. Алюминий легко обрабатывается, на его поверхность можно наносить электрохимическим способом защитные покрытия. Эти и другие преимущества ставят алюминий и его сплавы на одно из первых мест во многих отраслях промышленности, и прежде всего в авиации и космонавтике.

Однако сборка из алюминия и его сплавов намного затрудняется тем, что к алюминиевым деталям ничего нельзя припаять обычным способом. Трудность пайки алюминия состоит в том, что в отличие от большинства металлов его поверхность всегда покрыта тугоплавкой пленкой окиси алюминия, которая образуется при соприкосновении металлов с кислородом воздуха. Пленку можно удалить с помощью сильнодействующих раство-

рителей (флюсов), но это кропотливая и трудоемкая операция. Флюсы к тому же вызывают коррозию основного металла.

Одним из эффективных методов пайки алюминия является ультразвуковой метод. Для этого нужно ультразвуковой излучатель опустить в расплавленный припой, остальное сделают ультразвуковые колебания, а точнее, кавитация, вызванная ими. Пленка окисла разрушается непосредственно под расплавленным припоем, поэтому металл не успевает соединиться с кислородом воздуха и его поверхность смачивается припоем.

Ультразвуковой метод пайки иногда применяют для исправления брака в алюминиевых отливках — раковин, трещин, шлаковых включений. В этом случае дефектные места запаивают оловянно-цинковым припоем. После механической обработки исправленные места почти незаметны по цвету и структуре. И прочность их не снижается.

С помощью ультразвука можно лудить, а затем паять керамику и стекло, то есть делать то, что ранее было невозможным. А ведь керамика все больше и больше проникает в технику. Детали и узлы из керамики широко используются в радиотехнической, электронной, электротехнической аппаратуре.

Ультразвук меняет и сам процесс лужения. Детали помещаются в ванну с расплавленным припоем. Под действием ультразвуковых колебаний с деталей снимается слой окиси, и очищенная поверхность облуживается. Надежность ультразвукового лужения экспериментально проверена на целом ряде материалов, в том числе на керамике, ферритах, абразивных изделиях, кварце, угольных и графитизированных изделиях, стекле, рубинах, инваре, ниобии, тантале, молибдене, вольфраме, титане, германии.

Для пайки деталей из алюминия, феррита, керамики и других материалов мягким припоем без флюсов применяется ультразвуковой паяльник УЗП-0,025. Конструкция паяльника удобна и надежна в эксплуатации. Ультразвуковой паяльник УЗП2-0,025 — первая серийная модель в Советском Союзе.

Большой интерес для предприятий радиоэлектронной промышленности представляет установка «Звук-К», предназначенная для присоединения кристаллов к позо-

лоченным корпусам полупроводниковых приборов методом ультразвуковой пайки.

Для ультразвукового лужения создано много различных ванн, которые уже давно применяются на промышленных предприятиях. Одна из последних моделей ультразвуковых ванн, а именно УЗВЛ-0,4-44, является первым промышленным образцом с повышенной рабочей частотой. Предназначена она для лужения легкоплавкими припоями мелких деталей из алюминия и его сплавов, феррита, керамики, стекла и других материалов.

УЛЬТРАЗВУКОВОЙ КОНТРОЛЬ

Глаз человека, несмотря на свое изумительно тонкое устройство, далек от совершенства. Человек не видит микроскопические предметы, плохо различает предметы, удаленные на большие расстояния. И само собой разумеется, плохо видит ночью, в тумане. Но человек стремится преодолеть эти ограничения. Он создал микроскоп и телескоп. А как заглянуть внутрь непрозрачных предметов и материалов, увидеть процессы, проходящие в невидимых средах?

Пышущий жаром стальной слиток до тридцати раз проходит между валками прокатного стана, становясь все тоньше, пока не превращается в длинный и широкий лист. Затем могучие прессы отштампуют из него части кораблей, самолетов, ракет, детали турбин, сложных агрегатов. Им придется выдерживать гигантские нагрузки, скорости, давления. А что если в стальном листе будет какой-либо внутренний дефект? Тогда авария? Контролеры внимательно исследуют готовые листы. Заметить поверхностные повреждения — не проблема. Но что таится в самой толще металла? Многое могут сказать рентгеновские и гамма-лучи, но далеко не все: они «заметят» лишь относительно большие дефекты, мелкие же останутся незамеченными.

В 1928 году советский ученый С. Я. Соколов на основе проведенных исследований и опытов предложил для выявления дефектов использовать ультразвук. Разработанные под руководством С. Я. Соколова приборы получили название ультразвуковых дефектоскопов. Они обеспечили приоритет СССР в этой области техники и получили мировое признание. С тех пор в лаборатории, ныне

носящей имя С. Я. Соколова, его ученики и последователи продолжают творческий поиск по созданию и совершенствованию ультразвуковых дефектоскопов.

Некоторые теоретические вопросы дефектоскопии высказаны еще задолго до первого практического применения ультразвука. В 1898 году в России и за рубежом была опубликована статья Н. Е. Жуковского «О гидравлическом ударе в водопроводных трубах». На первый взгляд она не имеет никакого отношения к истории ультразвуковой дефектоскопии. В статье описаны способы защиты водопроводных труб от гидравлических ударов, возникающих при мгновенной остановке потока воды. Удары бывают настолько сильными, что приводят к разрыву труб.

Н. Е. Жуковский с тремя своими сотрудниками выяснил причины этого явления и нашел средство борьбы с ними. Они наблюдали разрыв столба жидкости в трубах при отрицательных давлениях и явления захлопывания в образующихся при этом кавитационных полостях. Ученые определили, как возникают удары, почему растет и падает давление, с какой скоростью распространяются возмущения, вызванные внезапным закрытием, и т. д.

Диаграммы распространения ударных волн вначале показались ошибочными, так как ученые обнаружили в них неожиданные отклонения от теоретических данных. Однако в дальнейшем Жуковский убедился, что такие отклонения вполне закономерны и вызваны скоплениями воздуха, оставшегося в трубах от снятых манометров. Это навело исследователей на мысль, что определять расположение внутренних дефектов, так же как и пузырьков воздуха, можно с помощью прямого и отраженного ультразвукового импульса. Нужно только точно измерить время пробега ультразвуковой волны от источника возникновения до препятствия и обратно. В опубликованной работе была высказана не только идея этого метода, но и даны математические расчеты и теоретические обоснования. Таким образом, пионером ультразвуковой дефектоскопии можно считать Н. Е. Жуковского.

Ультразвуковая дефектоскопия — один из методов неразрушающего контроля. Сейчас ультразвуковой контроль все чаще применяется в различных отраслях промышленности. В ряде технологических процессов (прокат стальных листов, изготовление труб и др.) ультразвуко-

вые дефектоскопы встраиваются в автоматические линии, что значительно ускоряет процесс контроля и повышает производительность труда.

Существует несколько методов ультразвуковой дефектоскопии, основными из которых являются: теневой, импульсный, резонансный метод структурного анализа, импедансный метод, метод свободных колебаний и др. Тот или иной метод применяется в зависимости от характерных особенностей контролируемых изделий (материал, размеры, конфигурация и т. д.), разновидностей дефектов (раковины, трещины, расслоения, непровары), а также от тех параметров, которые необходимо получить.

Теневой метод основан на ослаблениии проходящего ультразвука при наличии внутри детали дефектов, создающих ультразвуковую тень. Если в детали отсутствуют дефекты, ультразвуковая волна движется прямолинейно, пока не достигнет противоположной стороны изделия. Чем больше дефект, тем значительнее ослабление ультразвука, и наоборот.

Теневой метод малочувствителен, поэтому дефект обнаруживается в том случае, если вызываемое им изменение сигнала достигает не менее 15—20 процентов. Если же дефект очень мал, то ослабление ультразвуковой волны будет незначительным, и следовательно, он останется незамеченным. Существенный недостаток теневого метода состоит также и в том, что в большинстве случаев невозможно определить, на какой глубине находится дефект. Кроме того, теневой дефектоскоп не всегда удобен в работе, так как для обнаружения дефекта излучатель и приемник ультразвука необходимо прикладывать к двум противоположным поверхностям детали, а это не всегда возможно. Поэтому теневой метод дефектоскопии применяется в основном для проверки тонких изделий, в частности стальных листов.

Для контроля качества горячекатаных листов применяются автоматизированные установки и дефектоскопы УЗУЛ, УКЛ, «Прокат», «Сплав», УД-61УА, УД-71УА, ДПГ-204. Ими можно выявлять дефекты листов толщиной от 2 до 50 миллиметров. Ультразвуковые установки УДЦ-41, УДЦ-50 выявляют внутренние дефекты круглых и квадратных поковок на глубине 150 миллиметров. Ультразвуковой дефектоскоп ДСТ-5М применяется для автоматического контроля качества продольного шва, маркировки и сортировки труб в линии трубоэлектросварочного

станка 51-152. Ультразвуковая полуавтоматическая установка ДУК-17 контролирует пластмассовые гребные винты. Результаты контроля записываются на электротермическую бумагу ЭТБ-2 и наблюдаются на экране электронно-лучевой трубки. Обнаруживаются дефекты размером 0,5 квадратных сантиметра.

Импульсный метод (эхо-метод) ультразвуковой дефектоскопии в отличие от теневого основан на явлении отражения ультразвуковых волн. Ультразвуковой импульс, посланный излучателем, проходит сквозь проверяемое изделие и отражается от противоположной его поверхности в виде эхо-сигнала. Если на пути ультразвукового импульса встретится трещина или раковина, то он отразится от них, что будет зарегистрировано на экране дефектоскопа в виде всплеска импульса. Если в детали несколько трещин или раковин, расположенных одна за другой, то на экране дефектоскопа появится несколько всплесков.

Ультразвуковой импульсный метод обладает рядом преимуществ перед теневым. Он позволяет исследовать изделия при одностороннем доступе к ним, так как в данном случае не требуется устанавливать приемник ультразвука с противоположной стороны проверяемого участка, как при теневом методе. Чувствительность импульсного метода значительно выше теневого. При теневом методе ослабление ультразвука от 100 до 95 процентов не будет зарегистрировано, при импульсном будет замечено отражение даже одного процента ультразвуковой энергии. Преимущество импульсного метода состоит еще и в том, что он позволяет не только с повышенной чувствительностью обнаружить мельчайшие дефекты, но и определить, на какой глубине они находятся. По величине отраженного эхо-сигнала можно составить представление о размерах дефекта.

У импульсного метода есть недостаток — его нельзя применять для контроля изделий малых размеров. Это объясняется тем, что у импульсных дефектоскопов есть так называемая «мертвая зона», то есть участок у поверхности детали, в котором дефект не будет обнаружен по той причине, что в момент возвращения эхо-сигнала от дефекта еще продолжается излучение прямого импульса. «Мертвая зона» дефектоскопа будет тем меньше, чем меньше длительность импульса. Длительность импульса определяет и разрешающую способность дефектоскопа,

то есть минимальное расстояние по глубине между дефектами, при котором эхо-сигналы от этих дефектов будут наблюдаться на электронно-лучевой трубке раздельно.

На промышленных предприятиях применяются ультразвуковые импульсные дефектоскопы типа УД, УДМ, ДУК и др. К некоторым дефектоскопам, например к дефектоскопу ДУК-66, предусмотрены приставки «Кварц Т-4Б» для автоматического контроля выхода толщины стенки труб за пределы установленных допусков и «Ритм-1» для ручного и автоматического контроля деталей с грубообработанной, крашеной, покрытой тонким слоем пластика поверхностью.

При выявлении дефекта в изделии, скажем в листе или трубе, важно знать точное место его расположения. Для этой цели предназначен быстродействующий отметчик дефектов «Метка-1». Он рассчитан на работу совместно с ультразвуковым дефектоскопом.

Повышение надежности, качества и долговечности сварных конструкций является одной из наиболее важных и сложных проблем. Неразрушающие методы контроля развивались в направлении повышения чувствительности и надежности выявления дефектов в сварных конструкциях различного типа и автоматизации процесса контроля. Особенно заметен прогресс в применении ультразвуковых методов контроля в условиях поточного производства, где необходима высокая производительность. Для автоматического контроля труб применяются ультразвуковые установки и дефектоскопы ИДЦ-3М, ИДЦ-6, ИДЦ-8М, ИДЦ-10, «Ротор», «Микрон-3», «Микрон-4» «Днестр-1», «Винт-2» и др.

Импульсный метод ультразвуковой дефектоскопии используется не только для выявления внутренних дефектов, но и для измерения толщины стенок труб, листов, резервуаров, обшивок и т. п. Так, например, ультразвуковые толщиномеры применяются для измерения толщины стенок разнообразной аппаратуры химической и нефтеперерабатывающей промышленности в процессе эксплуатации при доступе с одной стороны. Толщина стенок контролируется измерением интервала времени между посланным ультразвуковым импульсом и первым его отражением от противоположной поверхности стенки. Так, для освидетельствования подземных резервуаров применяются ультразвуковые импульсные толщиномеры

УИГ-79, УИГ-Т10. Опыт работы показал, что они надежны в эксплуатации, просты в обращении и точны. Их можно использовать и для контрольных замеров износа стенок магистральных нефте- и газопроводов, степени коррозии стенок резервуаров, трубопроводов с газами, жидкостями, при освидетельствовании котлоагрегатов, колонн реакторов, сосудов, внутренний осмотр которых невозможен. Ультразвуковой толщиномер ИРТ-2 предназначен для автоматизированного непрерывного контроля толщины стенки труб толщиной 0,15—0,20 миллиметра и диаметром 6—24 миллиметра.

Возможности импульсных дефектоскопов с каждым годом расширяются. Так, например, для того чтобы повысить массу и скорость движения железнодорожных поездов, должна быть уверенность в высоком качестве рельсов. Если еще сравнительно недавно тысячи путепроходчиков постукивали молотком по рельсу и по звуку определяли, нет ли в нем дефекта, то теперь с этой ролью справляется ультразвуковой переносной дефектоскоп. Раньше контролер передвигал дефектоскоп по рельсу, теперь он устанавливается на специальные тележки. Дальнейшее совершенствование этого метода привело к тому, что дефектоскопы начали устанавливать в обычных вагонах, превратив их в своеобразные лаборатории.

В МВТУ имени Н. Э. Баумана разработан метод контроля различных продольно-прессовых соединений при помощи ультразвука. Сущность его такова. При «прозвучивании» сопряжения часть ультразвуковой энергии проходит через него, а другая часть отражается. Чем меньше зазор в сопряжении, тем больше прохождение ультразвука и меньше отраженное «эхо». Размер зазора зависит от контактного давления, величину которого нетрудно определить по величине отражаемой энергии.

Значительный интерес представляет ультразвуковой дальномер УД-1 для бесконтактного дистанционного контроля взаимного и пространственного положения элементов машин и конструкций в цеховых и естественных условиях их эксплуатации. Дальномер обеспечивает возможность автоматического измерения расстояний до 5 метров при удалении индикаторного устройства от блока преобразователей на расстоянии 30 метров. В дальномере предусмотрена возможность подключения перьевых самопишущих приборов для записи процессов автоматического измерения.

Резонансный метод ультразвуковой дефектации основан на использовании незатухающих колебаний. Колебания высокой частоты, вырабатываемые генератором, непрерывно излучаются ультразвуковой головкой в проверяемое изделие. Известно, что любое тело, предмет, деталь имеет свою собственную частоту, которая зависит от их размеров. У тонкой детали высокая резонансная частота, у толстой — низкая (вспомните, как звучит большой церковный колокол и маленький ручной колокольчик). Если собственная частота изделия будет равна частоте генератора, то возникнет резонанс. Зная частоту излучаемых ультразвуковых колебаний и скорость их распространения в материале контролируемого изделия, легко определить размеры дефекта и глубину его расположения.

Резонансный дефектоскоп работает примерно так. Он настраивается на резонансную частоту изделия. Теперь, если ультразвуковую головку перемещать по изделию, то во всех местах с иной толщиной или с дефектом резонанса не будет. Резонансный ультразвуковой дефектоскоп чаще используют там, где возможен доступ к контролируемым изделиям только с одной стороны (обшивки кораблей, котлов, оболочек кабеля и т. п.).

Долгое время кораблестроители раковину или непровар в шве отыскивали пробным сверлением. Для этого приходилось сверлить сотни отверстий, а затем заваривать их. Теперь на судостроительных и судоремонтных заводах ультразвуковой дефектоскоп не только проверяет сварные швы, но и определяет степень износа корпуса судна от коррозии. Для проверки обшивки корабля только зачищается поверхность, а дальше уже действует ультразвук. Резонансный метод особенно удобен при проверке подводной части корабля без постановки его в док.

Дефектоскопы, основанные на резонансном методе, применяют и для проверки строительных материалов. О том, насколько невыгодным и непрактичным был старый метод, говорят следующие данные: раньше от каждой заводской партии кирпича, например, приходилось отбирать 5—10 изделий и распиливать их на куски. По одним кускам определяли прочность, по другим — пористость, по третьим — удельный вес. Все это требовало времени и большого труда.

Для измерения толщины стенок изделий, доступ к которым имеется только с одной стороны, служат

ультразвуковые толщиномеры — ТУК-3, ТУК-4В и др. Одна из последних моделей ультразвуковых резонансных дефектоскопов — иммерсионный дефектоскоп «Металл-2М». Он предназначен для непрерывного контроля толщины изделий из металла, стекла, керамики, а также для обнаружения расслоений в биметаллических изделиях с использованием явления иммерсионного резонанса. Измерение толщины изделия приводит к включению сигнальных лампочек, после чего на выходе прибора появляется сигнал, приводящий в действие дефектоотметчик или отбраковочное устройство. Отличительная особенность прибора заключается в том, что его не нужно каждый раз настраивать на скорость распространения ультразвуковых колебаний при переходе на изделия из другого материала. Необходимо установить только пределы контроля.

Резонансный метод ультразвуковой дефектоскопии применяется не только в производственных целях, но и при решении некоторых теоретических проблем. Исследования показали, что резонансный метод контроля можно использовать для определения характеристик твердого тела в условиях высоких температур. Это позволяет выбрать наиболее целесообразный технологический режим в том или ином производстве.

Метод структурного анализа. В машиностроительной промышленности предъявляются повышенные требования к структурному строению материалов. В начале книги были рассмотрены основные физические характеристики и свойства звука, говорилось, что звуковые волны по мере удаления от источника теряют энергию, затухают. Сообщалось также о том, что интенсивность затухания связана непосредственно с качественной характеристикой среды, в которой распространяются волны. Именно эта связь и легла в основу относительного метода структурного анализа.

Этот метод применяется в металлургической, машиностроительной, химической и других промышленностях, где нередко требуется, чтобы материалы по своей структуре соответствовали требованиям стандартов. Относительный метод структурного анализа можно применять для контроля величины зерна в сталях, определения величины графитных включений в сером чугуне, контроля структуры высокопрочного чугуна.

Из самого названия метода следует, что его суть — в сравнении. Исследуемый материал по скорости и интен-

сивности распространения ультразвукового излучения сравнивается с эталоном. Всякое изменение в структуре металла отражается на скорости распространения ультразвука. Так, установлено, что в чугуне с увеличением размеров зерен кристаллической структуры скорость ультразвука несколько снижается. То же самое происходит при исследовании ряда цветных сплавов.

Структурный анализ металлов можно проводить ультразвуковым широкодиапазонным дефектоскопом УСАД-61. Для автоматического измерения величины зерна в материале особо тонкостенных труб из коррозионностойких сталей создан ультразвуковой прибор «Кристалл-1». Размер зерен определяется по максимальным амплитудам импульсов волн. На каждое отклонение величины зерна от нормы прибор подает световые сигналы.

Импедансный метод разработан советским ученым Ю. В. Ланге в 1958 году. Он основан на использовании зависимости полного механического сопротивления (импеданса) контролируемого изделия от качества соединения отдельных его элементов между собой. Различия в физических свойствах как самих материалов, так и применяемых клеев создают значительные трудности в выявлении дефектов уже известными методами неразрушающего контроля (теневым, импульсным, резонансным).

Импедансный метод используется для дефектоскопии клеевых соединений и применяется в тех случаях, когда требуется надежный стопроцентный контроль паяных соединений. Контроль может быть автоматизирован, а показания индикатора можно записывать на электротермической бумаге.

Для контроля клееных и паяных соединений в многослойных конструкциях применяется импедансный дефектоскоп ИАД-2. Прибор позволяет выявлять зоны нарушения соединений в конструкциях, имеющих тонкую обшивку, приклеенную или припаянную к элементам жесткости. Техника контроля с помощью дефектоскопа ИАД-2 довольно проста. Оператор устанавливает датчик на контролируемое изделие и, слегка прижимая, водит концом датчика по этой поверхности. При наличии дефекта в соединении загорается сигнальная лампочка.

Для обнаружения дефекта клеевого соединения между обшивкой и заполнителем в клеевых сотовых панелях служит полуавтоматическая установка ПИ-2. В ее комплект входит дефектоскоп ИАД-2. Результаты контроля

записываются на электротермическую бумагу в форме диаграммы, представляющей собой вид изделия в плане. Полуавтомат ПИ-2 позволяет объективно оценивать качество изделий.

Метод свободных колебаний основан на анализе частотного спектра свободных колебаний в системе, возбужденной резким ударом. Частота колебаний будет равна резонансной частоте данного тела. Метод свободных колебаний — один из наиболее старых из всех методов дефектоскопии. Им давно пользуются при проверке изделий из стекла, фарфора, керамики и хрусталя. Слегка ударив по изделию, по его звучанию можно определить, есть в нем трещина или нет. Изменение тона звучания свидетельствует о том, что имеется дефект. Безусловно, такая проверка носит субъективный характер, только опытный контролер может более или менее точно обнаружить дефект. Однако нынешнее массовое производство не может удовлетвориться таким в общем-то дедовским способом контроля. Оно нуждается в более объективном и, главное, более производительном методе.

Прибор, основанный на методе свободных колебаний, действует следующим образом. Блок датчика, укрепленный на якоре электромагнита, ударяет по поверхности контролируемого изделия, возбуждая в изделии свободные колебания. Микрофон, установленный на поверхности изделия на некотором расстоянии от датчика, воспринимает эти колебания и передает электрические сигналы на усилитель. Усиленные сигналы поступают на индикатор. Если датчик попадает в зону расположения дефекта, амплитуда возбуждаемых в изделии колебаний падает, сигнал на выходе усилителя уменьшается, и на индикаторе загорается сигнальная лампочка. Этим прибором можно обнаружить дефект склейки листовой обшивки из дюралюмина с пенопластом толщиной 0,8 миллиметра. Один из таких приборов — частотный испытатель качества проклея (ЧИКП). Он применяется в тех случаях, когда другие методы контроля не дают должного эффекта. Так, например, он используется для контроля качества склейки материалов между собой или с металлической обшивкой, если эти материалы имеют высокий коэффициент затухания упругих колебаний — фанера, текстолит, асботекстолит.

Метод ультразвуковой визуализации основан на преобразовании ультразвукового изображения в видимое,

что позволяет не только обнаруживать дефекты, но видеть их форму и размеры. И это одно из самых значительных достижений, приведшее к возникновению нового направления в физике — интроскопии, науки о ви́дении в непрозрачных средах. Осуществляется на практике теперь то, о чем издавна мечтал человек.

Ультразвуковая волна, встретив на своем пути объект съемки, как бы «ощупывает» его. Отраженные объектом ультразвуковые лучи — это, по сути дела, пока скрытый от нас образ объекта. Его нужно «проявить». Для этого воспользуемся установкой С. Я. Соколова, основная часть которой — звукочувствительная трубка, работающая на основе пьезоэлектрического эффекта. Мы уже знаем, что если изменять форму пьезоэлектрического элемента, например «давить» на него ультразвуковой волной, то на его гранях возникнут противоположные электрические заряды. Материалом такого элемента — мишени, как его называют,— может быть кварц, сегнетова соль, титанат бария и другие пьезоэлектрики.

Не вдаваясь в тонкости физических процессов, скажем, что установку С. Я. Соколова можно уподобить телевизору: и там и здесь отснятый объект воспроизводится на экране кинескопа. Вот мы скрытый от нас объект облучили ультразвуковым пучком. Отразившись от объекта, он попадет на приемную грань пластины-мишени, вызовет в ней пьезоэлектрический эффект, и на другой грани мишени возникнет как бы электрический «рисунок» объекта. Остается теперь его «срисовать», пропустить через усилительный каскад, а затем подать на экран кинескопа. Если есть трещины, раковины и прочие внутренние дефекты, ультразвук точно покажет их на экране.

С помощью ультразвука можно вести наблюдение и в жидкости. Радиус действий обычных подводных телевизионных установок даже в чистой воде не превышает нескольких десятков метров. При ультразвуковом телевидении зона видимости в любой жидкости будет одинаковой и значительно большей, чем дальность распространения света.

Ультразвуковое ви́дение имеет несколько методов, из которых электронно-акустический наиболее широко применяемый. Преимущество этого метода — высокая чувствительность. Прибор, основанный на электронно-акустическом методе, впервые предложил, как мы уже сказали,

С. Я. Соколов, назвав его ультразвуковым микроскопом. Чувствительность прибора была сначала очень низкой. Однако исследования в этом направлении настойчиво продолжались. В результате глубокого изучения физических процессов, происходящих в электронно-акустических преобразователях, советским ученым П. К. Ощепкову, Л. Д. Розенбергу, Ю. Б. Семенникову удалось повысить чувствительность прибора в сотни тысяч раз.

Без преувеличения интроскопы сказочно расширили наши возможности, мы теперь способны заглянуть внутрь непрозрачных тел и веществ. Эти чудесные приборы стали незаменимыми помощниками металлургов, машиностроителей, химиков, медиков, биологов, астрономов, геологов и других специалистов.

Ультразвуковая аппаратура для ви́дения в непрозрачных средах позволяет обнаружить твердые тела и газовые пузыри в жидкостях, трещины, раковины, шлаковые и металлические включения, пустоты в металлах. Ультразвуковые интроскопы могут контролировать качество соединений металла при электросварке. Они позволяют увидеть, как распределены в стальном слитке легирующие добавки, рассмотреть зоны термической обработки, определить степень «усталости» металла. Интроскопы могут следить за тончайшими процессами, происходящими в живой клетке, позволяют, не прибегая к скальпелю, посмотреть, как устроены кровеносные сосуды.

Интроскопы, к сожалению, дают пока плоское изображение, что не всегда удовлетворяет требованиям, предъявляемым к контролю особо ответственных деталей и узлов. Когда была теоретически открыта и практически осуществлена голография, позволяющая получать объемные изображения предметов, интроскописты не замедлили обратить на нее внимание.

Фотографический снимок представляет собой плоское изображение предмета в двухмерной проекции. Как снимок не поворачивай, изображение останется плоским. То же самое в обычном кино. А вот в стереокино на его экране все предметы видно объемно и с четкой перспективой. Ученые задались целью: нельзя ли получить объемное изображение предмета, находящегося в непрозрачной жидкости?

Физическая основа голографии — это давным-давно известное оптикам явление интерференции волн. Но, как потом выяснилось, для получения голограммы годятся

волны любой природы. Так, если с помощью излучателя, находящегося под водой, направить вверх пучок ультразвуковых колебаний, то на поверхности образуются стоячие волны. Два излучателя создадут на поверхности воды интерференционный узор. Если на пути одного из ультразвуковых пучков расположить плотный объект, на поверхности воды появится пока невидимое для нас объемное изображение предмета. Если теперь на него направить луч лазера, невидимое станет видимым — мы получим трехмерное изображение объекта, полностью отражающее все его признаки.

Голограмму можно записать на одной волне, а восстановить на другой. Следовательно, голограмма может быть записана на звуковых (ультразвуковых) волнах, а восстановлена светом. Этот прием и называется акустической (ультразвуковой) голографией.

Первые голографические установки были громоздки и несовершенны. И сейчас еще не преодолены до конца многие технические трудности на пути к широкому внедрению голографии в практику. Но поскольку голографические исследования находятся в центре внимания множества научных коллективов мира, то можно надеяться, что эти трудности будут преодолены. И тогда голографические методы позволят не только получать объемное изображение предметов, обнаруживать в них дефекты, но и легко регистрировать мельчайшие структурные изменения, возникающие вследствие развития в материалах усталостных процессов. Помимо дефектоскопии, звуковая (ультразвуковая) голография может применяться при изучении рельефа морского дна, в звуколокации, звуконавигации, поиске полезных ископаемых, исследовании структуры земной коры и т. д. Ультразвуковая голография уже находит широкое применение в медицине.

УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ЭКСПРЕСС-АНАЛИЗ

Во многих производственных процессах контроль состава и свойств веществ представляет собой трудноразрешимую проблему. Чтобы проверить, например, концентрацию жидкой среды, определить момент окончания какой-либо реакции, приходится брать многочисленные

пробы для анализа. А ведь на каждую пробу и ее анализ требуется время. Мало того, взятие проб и проведение их анализа не во всех случаях занятие безопасное и полезное для здоровья. Да и не только это, есть и другие сложности и трудности. В целом ряде случаев они уже преодолены: наука щедро поделилась с технологией своими методами контроля и анализа — радиопротонным, рентгеноспектральным, полярографическим, вихревых токов, ядерного магнитного резонанса и др. Каждый из них имеет свои положительные стороны, но у всех есть общий недостаток — малая универсальность. В последнее время для этой цели был рекомендован ультразвук. К нему ученые пришли постепенно, после многих экспериментальных исследований, изучив условия распространения ультразвука в различных жидкостях и растворах.

Ультразвук быстро, точно, зачастую там, где другими способами это невозможно, исследует состав и структуру материалов в твердом, жидком, плазменном или газовом состоянии. Ультразвуковые методы контроля состояния среды и измерения свойств вещества очень удобны, так как они точны, не нарушают структуру исследуемого вещества и скоротечны. Эти методы не требуют взятия специальных проб: исследование ведется без остановки производственных процессов, в реакторе, тигле, на работающей детали или конструкции при любых температурах и давлениях.

Физическая сущность ультразвуковых методов контроля основана на измерении ультразвуковых полей, изучении и контроле законов распространения ультразвуковых колебаний в различных средах, на непрерывном определении величин скорости распространения или затухания ультразвука в исследуемой среде. По скорости распространения или коэффициенту затухания ультразвука (а этот коэффициент, как уже говорилось, зависит от состава, структуры и физико-химических свойств вещества) можно установить молекулярное строение вещества, а также определить концентрацию исследуемых жидких и газообразных сред и наличие в них примесей. Даже самые незначительные примеси в той или иной среде могут заметно изменить величину скорости распространения ультразвуковых волн. Измерение скорости распространения ультразвука позволяет вычислить молекулярную массу, коэффициент линейного расширения, теплоемкость и многие другие характеристики вещества.

Приборы для контроля состава и свойств вещества ультразвуковыми методами можно подразделить на следующие основные группы: приборы, производящие экспресс-анализ физико-химических процессов; ультразвуковые уровнемеры и сигнализаторы уровня; приборы, измеряющие скорости потоков, температуру, расход жидкостей и газов. В свою очередь, все ультразвуковые контрольно-измерительные приборы разделяются на работающие в импульсном режиме и в режиме непрерывного излучения. При импульсном режиме в исследуемую жидкость посылаются короткие ультразвуковые сигналы-импульсы и измеряется время пробега их вдоль отрезка определенной длины.

Ультразвуковой экспресс-анализ физико-химических процессов может проводиться на принципе измерения скорости распространения ультразвука и величины поглощения (затухания). Предположим, что в сосуде происходит физико-химический процесс. Если концентрация раствора достигнет необходимой величины, то скорость распространения ультразвука в среде будет определенной, то есть время прохождения импульса от излучателя к отражателю и обратно будет соответствовать определенной величине. Если заранее прокалибровать индикатор или составить специальные графики, то можно не только делать отдельные замеры, но и непрерывно следить за процессом и управлять им.

Наибольшее распространение в последние годы получили приборы, основанные на методах измерения времени распространения ультразвука. К ним относятся импульсные и частотно-импульсные методы прямого измерения времени распространения ультразвука, а также импульсно-фазовый компенсационный метод косвенного измерения времени распространения ультразвука, то есть с помощью эталонной среды. Некоторые приборы уже успешно применяются в лабораториях и на промышленных предприятиях (УЗАС-7, УЗАС-3С, ОСП-В, ИК-2, УФИ-1М, КИУП-1, УЗК-11СБ и др.).

Если в контролируемой среде изменяются параметры, мало влияющие на изменение скорости распространения ультразвука, контроль ведется измерением поглощения (затухания) ультразвука. Работа такого прибора основана на использовании импульсного метода многократного отражения ультразвукового сигнала между излучателем и отражателем. Селектирующим устройством

выбирается отражение импульса и сравнивается по амплитуде вычислительным устройством. Измерения можно проводить как на отдельных пробах, так и на движущемся потоке контролируемой жидкости.

Прокат металла производят при определенной температуре заготовок, но по пути к прокатному стану заготовка остывает. Чтобы определить, на сколько она остыла и нужен ли дополнительный нагрев, в Московском станкостроительном институте разработан ультразвуковой прибор, позволяющий измерять температуру мгновенно. Он может автоматически следить за тепловым режимом во время шлифовки, не допуская перегрева деталей.

В промышленности для ряда производств необходимы сверхчистые материалы, в которых присутствие примесей не должно превышать одной десятитысячной или даже одной миллионной доли. Такое количество примесей очень трудно заметить. Например, проверка чистоты алюминия занимает две недели. С помощью ультразвукового метода проверка займет всего два часа. Как бы ни были ничтожны примеси, они все равно искажают кристаллическую решетку алюминия, а это, в свою очередь, влияет на распространение ультразвука.

Ультразвуковой экспресс-анализ успешно применяется в лабораторных исследованиях минеральных вод. Особенно это важно в тех случаях, когда надо оценить в лечебных целях вновь открытый источник минеральной воды.

Нашлось дело ультразвуковому экспресс-анализу и в молочной промышленности. Так, на Таллинском комбинате молочных продуктов с помощью ультразвукового анализатора стали определять жирность молока. Чтобы снять пробу, теперь достаточно полторы минуты вместо двадцати. Намного повысилась точность анализа, и не нужно заниматься трудоемкими исследованиями.

Измерение вязкости вещества — необходимый процесс на многих промышленных предприятиях, так как она в некоторых случаях является одной из основных его характеристик. По вязкости, например, судят о свойствах нефти или смазочных масел, она является одним из показателей пригодности краски для распыления.

Вязкость измеряется обычно приборами, которые называются вискозиметрами. Они определяют скорость вытекания жидкости через калиброванное отверстие. Этот способ трудоемкий и недостаточно точный. К тому же не

во всех случаях применим: невозможно, например, взять пробу жидкостей, обладающих радиоактивностью или находящихся при высоких температурах, под большим давлением. Несравнимо удобнее ультразвуковые вискозиметры, позволяющие непрерывно определять вязкость любой жидкости, в том числе и расплавленного металла. С помощью ультразвукового вискозиметра можно замерять вязкость и автоматически контролировать технологический процесс в циркулирующем потоке.

Существует несколько типов ультразвуковых вискозиметров. Один из них, наиболее часто применяющийся, основан на принципе демпфирования. Если металлический стержень, помещенный в жидкость, коротким ударом заставить колебаться, то через некоторое время колебания затухнут. При этом скорость спадания амплитуды будет зависеть от вязкости среды. Чем больше вязкость, тем быстрее затухают колебания.

Ультразвуковой вискозиметр прост по устройству, малогабаритен, надежен в эксплуатации и обеспечивает достаточную точность измерения. Он состоит из трех основных узлов: датчика-зонда, электронного блока и соединительного кабеля. Наиболее важный элемент прибора — датчик-зонд. Чувствительным элементом датчика служит плоская прямоугольная пластинка из ферромагнитного или пьезоэлектрического материала толщиной 0,2—0,4 миллиметра. Такие вискозиметры применяются в нефтяной промышленности. Электронную часть вискозиметра можно сконструировать так, чтобы при уменьшении амплитуды ниже определенного уровня включался генератор, который будет вновь возбуждать резонансный стержень. В зависимости от скорости затухания колебаний электронное счетное устройство вырабатывает напряжение, пропорциональное частоте включения возбуждающего генератора, а следовательно, и коэффициенту вязкости. Выработанное напряжение можно использовать для управления производственным процессом, и этим самым автоматически поддерживать необходимую вязкость вырабатываемого вещества.

Разработано несколько образцов отечественных приборов для практического применения. Так, ультразвуковой вискозиметр ВУЗ-1Л предназначен для непрерывного измерения вязкости жидких веществ в лабораторных условиях. Ультразвуковой вискозиметр ВАВ-3 используется при работе с высоковязкими материалами

например с полиамидной смолой. Для измерения абсолютного значения коффициента поглощения ультразвука в жидких средах пригоден ультразвуковой измеритель поглощения УЗИП-3.

На многих бензозаправочных станциях можно и сейчас еще наблюдать, как примитивно замеряют количество бензина в цистерне. Опускается в бензохранилище длинная рейка, затем ее вынимают и смотрят, до какого деления рейка смочена бензином. Способ простой, но не очень удобный и отнюдь несовременный. Измерительными рейками пользуются еще, к сожалению, на многих предприятиях. Иногда для определения уровня жидкости в емкости встраивают водомерные стекла. Но это тоже примитивный способ, а при некоторых условиях он вообще непригоден, в частности там, где приходится иметь дело с агрессивными жидкостями и газами. В этих случаях желательно, чтобы измерительные приборы находились не на самих емкостях, а где-то в диспетчерской, на общем пульте управления.

Такие приборы уже созданы и выпускаются серийно. Действие их основано на способности ультразвуковых волн отражаться от границы раздела двух сред. Приборы называются ультразвуковыми уровнемерами. Уровень жидкости можно измерить от верхней кромки сосуда или от его дна. Различие в устройстве уровнемеров состоит в том, что в первом случае датчик прибора укрепляется в верхней части емкости, а во втором случае в ее дне. Ультразвуковые уровнемеры удобны тем, что индикаторная аппаратура может находиться в другом помещении на значительном расстоянии от емкости. Одним комплектом оборудования можно контролировать несколько емкостей, если к индикаторному прибору поочередно подключать датчики от разных контролируемых емкостей.

На химических и других предприятиях применяются ультразвуковые уровнемеры и сигнализаторы уровня. Ультразвуковой уровнемер УЗУ-3 (УЗУ-14) предназначен для измерения уровня различных жидкостей в баках и резервуарах. Прибор обеспечивает непрерывное автоматическое дистанционное измерение уровня. Разновидность ультразвуковых уровнемеров — ультразвуковые сигнализаторы уровня (УЗК-40). Они более просто устроены и предназначены только для предупреждения о том, что жидкость в аппарате или трубопроводе находится на заданном уровне. С помощью ультразвукового сигнали-

затора уровня можно автоматически поддерживать необходимый уровень жидкостей, хранящихся в герметически закрытых емкостях. По типу приборы разделяются на сигнализаторы понижения уровня (УЗК-40Н) и сигнализаторы повышения уровня (УЗК-40В).

Роль ультразвуковых уровнемеров и сигнализаторов уровня особенно важна при работе с агрессивными и токсическими жидкостями, хранящимися в герметически закрытых емкостях. Ультразвуковые уровнемеры можно применять и для измерения уровня воды в водоемах, озерах и бассейнах.

Измерение скорости потока и расхода жидкости сейчас производится тоже с помощью ультразвука. А как иначе измерить, например, расход жидкости, протекающей по герметичному трубопроводу? Для этой цели применяются ультразвуковые расходомеры. Скорость распространения ультразвуковой волны в движущейся жидкости относительно неподвижных излучателя и приемника равна векторной сумме скорости ультразвука в неподвижной жидкости и скорости потока.

Предположим, что жидкость в приборе проходит слева направо. Если ультразвуковой импульс послать в направлении потока жидкости, то скорости ультразвука и потока будут складываться. Если же ультразвуковой импульс послать против потока, то скорость ультразвука будет меньше на величину скорости потока. Определив время прохождения ультразвука в первом и втором случае и зная расстояние между преобразователями, можно определить скорость потока.

Ультразвуковой расходомер чувствителен к быстрым изменениям скорости потока, что обеспечивает довольно точный учет расходуемой жидкости. Такие приборы нужны металлургическим и химическим предприятиям, когда необходимо замерить потоки агрессивных сред и пульп. Их можно применять также на гидроэлектростанциях для определения расхода воды в камерах турбин.

Ультразвуковой расходомер РУЗ-714 предназначен для контроля расхода растворов алюминиевого производства. Он работает по двухканальной схеме с преломлением ультразвукового луча. На металлургических производствах, где имеют дело с каменноугольной смолой, антраценовым маслом или мазутом, применяется расходомер УЗР-59.

Для мгновенного измерения массового расхода агрессивных и неагрессивных жидкостей служит акустический расходомер «Марс». Он состоит из преобразователя расхода «Вихрь-50-2» и указателя мгновенного расхода «Визир-1». Расходомер «Марс» измеряет кинетическую энергию движущегося потока жидкости с поправкой на скорость. Возникающие завихрения жидкости в зависимости от скорости потока воздействуют на пьезоэлектрические пластинки, на гранях которых появляются заряды. При повышении скорости потока жидкости увеличиваются завихрения, а следовательно, и давление на пьезоэлектрические пластины. Это в свою очередь приводит к изменению величины электрических зарядов, которые поступают на указатель мгновенного расхода.

УСКОРЕНИЕ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ

Ультразвуку в современной химии принадлежит одно из важных мест. Мы уже говорили о том, что вода под воздействием ультразвука как бы вскипает, молекулы начинают двигаться значительно быстрее. Ученые использовали эту удивительную способность ультразвука для ускорения различных производственных процессов. Любопытное сравнение: сила звука пушечного выстрела орудия равна приблизительно 0,01 ватта на квадратный сантиметр. А с помощью ультразвуковых колебаний, которые к тому же легко фокусировать, можно повысить давление в жидкости до десятков и даже сотен тысяч ватт на квадратный сантиметр поверхности.

Исследования показали, что при ультразвуковом облучении частицы вещества приобретают такую активность, которая приводит к цепной реакции. Это очень важное научное достижение, открывающее широкую перспективу практического применения. На его основе уже начало формироваться новое направление в химии — ультразвуковая химия.

Йодистый калий — бесцветное вещество, по виду его трудно отличить от обычной поваренной соли. Если через раствор йодистого калия пропустить мощный ультразвук, то он слегка пожелтеет. Что же произошло? Под действием ультразвука молекула йодистого калия, представляющая соединение одного атома йода с одним атомом

калия, разрушилась, выделился йод, который и окрасил раствор в желтый цвет.

Изучая химические превращения, происходящие под воздействием ультразвука, ученые установили, что ультразвук может не только ускорять окисление различных химических соединений, но в некоторых случаях оказывать прямо противоположное действие, то есть восстанавливать. Так, например, ультразвуком можно восстановить железо из его окислов и солей.

Каким же образом ультразвук воздействует на химические реакции? Разрежения, возникающие в мощном ультразвуковом поле, как мы уже говорили, могут быть настолько велики, что жидкость не выдерживает и разрывается, образуя множество микроскопических пузырьков, то есть возникает уже известная нам кавитация. Внутри пузырьков, помимо паров воды и воздуха, находятся также мельчайшие капельки воды, которые отрываются от ее поверхности в момент разрыва.

Установлено, что стенки кавитационного пузырька и капельки, находящиеся внутри него, заряжены разноименным электричеством. При сжатии пузырьков их размеры резко уменьшаются и заряды оказываются расположенными на пузырьках очень малых размеров. В результате этого электрическое напряжение сильно возрастает. Между стенками кавитационных пузырьков и капельками, находящимися внутри них, происходят электрические разряды, которые и являются главной причиной химического действия ультразвука. Но не только это. При захлопывании кавитационных пузырьков, как мы знаем, возникает огромное давление, сопровождающееся повышением температуры. Большое давление и температура также способствуют химическим превращениям.

Научные исследования и практические опыты показали, что применение ультразвуковых устройств позволяет значительно интенсифицировать такие химико-технологические процессы, как электроосаждение, полимеризация, деполимеризация, окисление, восстановление, диспергирование, эмульгирование, коагуляция аэрозолей, гомогенизация, пропитка, растворение, распыление, сушка, горение, дубление и т. д.

Под воздействием ультразвука значительно улучшается и ускоряется осаждение металлов и сплавов в гальванических и других электролитических процессах; осаждаемый металл приобретает мелкокристаллическую

структуру, уменьшается пористость покрытия. На электрохимических предприятиях используются специальные агрегаты и установки (ВУГ-1, ВУГ-3, ВУГ-4, ВУГ-5 и др.), предназначенные для ускорения гальванических процессов меднения, латунирования, цинкования, кадмирования, лужения и серебрения. Установки могут быть использованы в гальванических цехах машиностроительных и приборостроительных заводов, в часовой и ювелирной промышленности, а также на заводах легкой и пищевой промышленности.

Автоматические линии для нанесения гальванических и химических покрытий с помощью ультразвука позволяют вести эти операции в строгом соответствии с технологией, повысить качество и, конечно, создать более комфортные условия для рабочих.

Известно, что некоторые жидкости или очень трудно или совсем невозможно смешать, поэтому их так и называют несмешивающимися. К ним относятся вода и жир, вода и эфирные масла, вода и ртуть и многие другие. Но известно также, что в таких смесях, эмульсиях, нужда бывает великая. Барьер несмешиваемости помогает преодолеть ультразвук благодаря его способности вызывать кавитационный эффект. Так получают эмульсии, которые применяются для охлаждения режущих инструментов при металлообработке, высококачественные краски, лаки, шпаклевочные материалы и т. д. Многие химические процессы связаны с реакциями, протекающими между различными жидкостями. Эти реакции намного ускоряются под действием ультразвуковых колебаний. С помощью ультразвука можно также быстро растворить твердые тела в жидкостях, однако интенсивность ультразвуковых колебаний при этом должна быть значительно большей, чем при смешивании жидкостей.

Для промышленных целей в настоящее время создан ряд ультразвуковых аппаратов, принятых к серийному производству. Два, три таких аппарата, расположенных в небольшом помещении, способны заменить оборудование, которое занимает целый цех. Среди них ультразвуковой гидродинамический смеситель-эмульгатор УГС-10, ультразвуковые диспергаторы УДГ-К, УДГ-П, УДГ-С, а также гидродинамические ультразвуковые устройства УГУ-П, УГУ-Р, УГУ-В.

Ультразвук стал незаменимым при ускорении таких химико-технологических процессов, как полимеризация.

Полимеризация — химическая реакция соединения многих одинаковых молекул какого-нибудь ненасыщенного соединения в одну укрупненную молекулу. Полимеризация имеет огромное техническое значение, с ее помощью получают синтетический каучук, пластмассы, искусственное волокно и т. д. На долю веществ, синтезируемых методом полимеризации, приходится почти 75 процентов от их общего мирового производства. Степень полимеризации зависит от частоты ультразвуковых колебаний и значительно ускоряется при облучении сравнительно низкими частотами.

Деполимеризация также ускоряется под действием ультразвука. Хорошо деполимеризуются в растворах полистирол, каучук, белки, нитроцеллюлоза... Результаты ультразвуковой деполимеризации зависят от продолжительности ультразвукового облучения и его интенсивности, а также от концентрации раствора полимера. Не меньшее значение в ускорении процесса деполимеризации имеют кавитация, внешнее давление, термическое действие ультразвука, частота акустических колебаний и другие факторы.

Практика показала, что с ролью ускорителей технологических процессов хорошо справляются аппараты УПХА-РI, УПХА-Р8, УПХА-Ш8. Один из них, а именно унифицированный ультразвуковой колонный аппарат УПХА-Р8, обладает широким диапазоном. Он интенсифицирует полимеризацию, окисление, восстановление, поликонденсацию. Ему можно поручать сверхтонкое измельчение красителей, пигментов и других материалов.

Для коагуляции аэрозолей и ускорения процессов сушки служит установка ПУАС. Применение установки позволяет улавливать из газов мелкодисперсные жидкие и твердые частицы, а в сушилках — значительно сократить унос высушиваемого материала, повысить скорость сушки и снизить ее температуру. Низкотемпературная сушка с ультразвуковой сиреной ускоряет, например, испарение растворителя при склеивании деталей из полимеров, придавая конструкции необходимую прочность. Установка может применяться в химической, нефтеперерабатывающей, пищевой, фармацевтической, легкой промышленности.

Распыление жидкостей и расплавов. Здесь хорошо зарекомендовало себя ультразвуковое распылительное устройство РУЗ. Оно может быть использовано в хими-

ческой, нефтеперерабатывающей, фармацевтической, металлургической и многих других отраслях промышленности с целью интенсификации процессов в распылительных сушилках, очистительных установках, а также получения металлического порошка путем распыления расплавленных металлов. Распылительное устройство не имеет вращающихся и трущихся деталей и узлов, что обеспечивает высокую надежность в работе и позволяет, не останавливая процесса, регулировать интенсивность распыления.

Синтетические волокна успешно конкурируют с натуральными и по прочности и по экономичности. Но если хлопок, лен, шерсть легко окрашиваются и долго сохраняют цвет, то синтетические волокна трудно поддаются окраске и значительно быстрее тускнеют. Сотрудники Украинского научно-исследовательского института стекольной и фарфоро-фаянсовой промышленности предложили синтетические волокна обрабатывать керамическими красителями. Результаты превзошли все ожидания. Керамическая краска вместе с капроновой крошкой в среде азота расплавляется при определенной температуре. Потом эту массу вытягивают в нитку, но уже цветную. Повысить интенсивность окраски волокон керамическими красителями помог ультразвук. Он дал возможность достичь нужного измельчения пигментных зерен, получить высокодисперсные краски, способные равномерно распределиться по капроновой массе.

В Институте химической кинетики и горения разработан способ, повышающий эффективность сжигания окисленных углей. Воспламенение и горение таких углей стали вести в ультразвуковом поле. Ультразвук усиливает эффективность сгорания до 20 раз, что дает огромную экономическую выгоду. Используя этот же принцип, можно добиться и более эффективного сжигания жидких топлив — путем создания ультразвуковых форсунок.

Сотрудники Днепропетровского инженерно-строительного института создали ультразвуковую установку, которая успешно прошла испытания на Запорожском автоматизированном бетонорастворном заводе. Эта установка намного ускоряет процесс и производство бетона и позволяет экономить до 15 процентов цемента.

В Каунасском политехническом институте сконструирована ультразвуковая сирена. Вначале ее предполагали

применить для ускорения сушки фотобумаги. Однако при испытаниях выяснилось, что для этой цели ее использовать нельзя, так как она разрушает слой фотоэмульсии. Но ведь в холодной сушке нуждается не только фотобумага, но и ткани, волокна, кожа, меха и другие материалы. В Акустическом институте Академии наук СССР провели исследования по ультразвуковой сушке материалов, сходных по структуре с тканями, из которых шьют белье. Оказалось, что ультразвуковые колебания действительно способствуют бурному испарению влаги, не причиняя при этом никакого вреда самому материалу.

УЛЬТРАЗВУКОВАЯ ПРОПИТКА

Белорусские ученые под руководством академика Академии наук БССР Е. Г. Коновалова обнаружили ультразвуковой капиллярный эффект.

Образно говоря, открытие было сделано «на кончике резца». Ученые исследовали механизм действия смазочно-охлаждающей жидкости при резании металла. Если такой жидкостью поливать резец, то намного повышается чистота обработанной поверхности и стойкость инструмента. Между резцом и деталью возникает давление до 20—22 кгс/см^2, а жидкость проникает туда под давлением, близким к атмосферному. Какая же сила проталкивает жидкость в область столь высокого давления?

Многочисленные исследования показали, что резец, снимая стружку, колеблется с ультразвуковой частотой (до 22 000 герц). Он работает и как генератор ультразвука, и как объект, воспринимающий эти колебания. Ультразвуковое поле оказалось как раз той силой, которая проталкивает жидкость в зазор между резцом и деталью.

Для более наглядного объяснения капиллярного эффекта проделали два простейших опыта. Первый: в дно сосуда с жидкостью встроили ультразвуковой излучатель. Тончайшую трубочку-капилляр опустили в жидкость, уровень в ней установился на определенной высоте. Когда включили ультразвуковой генератор, жидкость в трубочке поднялась на десятки сантиметров. Ни при каких других условиях такая высота и такая скорость подъема просто невозможны. При втором опыте подкрасили

воду в трубочке. Четко обозначились узлы и разрежения стоячей волны. Было видно, что ультразвук как бы сжимает отдельные порции жидкости и подталкивает их вверх, порция за порцией пока работает источник ультразвука.

Ультразвуковой капиллярный эффект «проливает» свет на явление, казавшееся до сих пор загадочным. На острове Ява на склонах вулканов растет цветок королевская примула. Местные жители называют его «цветком землетрясений», потому что он расцветает всегда накануне извержения вулкана. Цветок этот никогда не ошибается. Яванцы знают: если цветок в неурочное время выбросил бутоны — жди беды. В чем здесь дело? Перед мощными подземными толчками и началом извержения вулкана возникают слабые колебания самых различных частот, в том числе и ультразвуковые. Они-то и ускоряют движение питательных соков по капиллярам растения, интенсифицируют процесс обмена веществ, и цветок распускается.

Капилляры — это не только лабораторные трубочки минимального сечения. Они есть всюду — в почве, внутри любого кирпича, камня, в некоторых металлических и в металлокерамических изделиях, в тканях, бумаге. Каждое дерево — сплошные капилляры. Они внутри нас — их там в общей сложности около 100 тысяч километров.

Стало быть, у открытого белорусскими учеными ультразвукового капиллярного эффекта есть широчайшее поле практического применения — в технике, биологии, медицине, пищевой промышленности и т. д. Тут и склеивание металлических изделий жидким клеем, и пропитка различных материалов составами, повышающими прочность и долговечность изделий, и изготовление консервов, соление и квашение овощей, и выращивание растений методом гидропоники, и изготовление радиотехнических и металлокерамических деталей... и даже введение лекарственных препаратов с помощью ультразвукового (и потому безболезненного) «укола».

С помощью ультразвука пропитывают маслом железографитные детали. По сравнению с обычной и вакуумной пропиткой время процесса сократилось соответственно в 15—20 и 6—10 раз. Ультразвуковой пропиткой можно обрабатывать рубероид, шпалы, шахтные канаты, асбоцементные плиты, текстолит, гетинакс, алюминиевое литье. Этим методом можно производить промас-

ливание и трансформаторов. Имеется возможность пропитки пористых материалов даже расплавленными металлами, в результате чего, например, упрощается процесс заполнения припоем мельчайших отверстий при изготовлении герметических приборов и установок.

Есть определенная выгода во внедрении ультразвукового капиллярного эффекта в сложный и трудоемкий процесс изготовления кабеля с джутовой прокладкой под его броню. Если бобины джута поместить в ванну с пропиточным составом, который затем подвергнуть воздействию ультразвуковых колебаний, то он будет «вгоняться» в волокна (капилляры) джута. Время пропитки сократится в десятки раз.

Этот метод использовали и для пропитки электротехнических изделий, а также для герметизации литых пористых деталей и достигли при этом существенного технологического и экономического эффекта.

Процесс ультразвуковой пропитки хорошо поддается механизации с использованием ультразвуковых ванн УЗВП-3, УЗВП-3А и установки конвеерного типа УЗВП-4 для интенсификации пропитки обмоток, катушек, трансформаторов, роторов, статоров и других электромеханических деталей.

Чтобы наполнить (пропитать) древесину модифицированными смолами, тоже применили ультразвуковую установку. Из торца заготовки вакуумное устройство отсасывает влагу и создает разряжение в порах древесины. В противоположный торец с помощью ультразвука под давлением нагнетается смола, которая сравнительно быстро наполняет заготовку вдоль волокон. Такая установка эффективна в деревообработке и фанерном производстве для декоративной древесины различными красителями. Так же пропитывают пластифицированную древесину, которая заменяет бронзу при изготовлении вкладышей подшипников.

В Украинском научно-исследовательском институте полиграфической промышленности ультразвуковой капиллярный эффект использовали для повышения эффективности операции склеивания в брошюровочно-переплетном производстве. Операции склеивания занимают значительное место в технологических процессах обработки печатной продукции. Они обеспечивают соединение отдельных деталей, образуют несущие покрытия (заклейка корешков книжных блоков, бесшвейное скрепление

и т. д), что во многом предопределяет качество готовой книги. Новый метод позволяет расширить ассортимент синтетических материалов, пригодных для отделочно-переплетных работ.

При склеивании жидкими клеями ультразвук активизирует проникание раствора клея в поры материала. Особенно высокий эффект достигается, когда применяются термопластичные клеи, а также материалы с предварительно нанесенными на них полимерными пленками. Ультразвуковое склеивание обеспечивает достижение высокой прочности и в то же время позволяет ускорить весь технологический цикл, поскольку становится ненужной операция сушки и не надо заботиться о том, чтобы не повреждались склеиваемые материалы. При бесшвейном (клеевом) скреплении книжных блоков ультразвуковая обработка создает благоприятные условия для впитывания клея в поры бумаги, повышает прочность связи на границе «клеевая пленка — бумага». С помощью ультразвука возможно и бесклеевое соединение материалов, обладающих необходимыми для этого свойствами.

УЛЬТРАЗВУК В МЕТАЛЛУРГИИ

Металлурги знают, что одна из основных «болезней» металла — это наличие в нем газов. Даже ничтожное количество (сотые и даже тысячные доли процента) газовых и неметаллических примесей в металлах и сплавах снижает их прочность и пластичность, что, естественно, сказывается потом на дальнейшей обработке (прокатке, штамповке, например) и качестве изготовленных из них изделий. Избежать такого «заболевания» можно с помощью все того же ультразвука. Под действием ультразвуковых колебаний из расплава выделяется растворенный в нем газ и «изгоняются» неметаллические включения. Этот процесс металлурги назвали дегазацией.

Ультразвуковая обработка металлов — один из новых эффективных способов, применяющихся в металлургии для улучшения качества металлов. Облучение ультразвуком расплавленного металла приводит к заметному измельчению зерна и уменьшению пористости. Кроме того, ультразвук повышает механические свойства за-

твердевших расплавов и намного улучшает способность металла к пластической деформации.

Известно, что большинство металлов и сплавов в процессе литья активно взаимодействуют с газами. Но особенно старательно и, можно сказать, жадно это делает алюминий. Причем из всех газов, попадающих в расплавленный алюминий и его сплавы, 80 процентов приходится на долю водорода. Избавляться от водорода да и от других примесей помогает ультразвук, вызывающий в расплавленном металле кавитацию. Именно она ускоряет процесс выделения газовых пузырьков, то есть ускоряет дегазацию. Дегазирующее действие ультразвука возрастает с увеличением количества кавитационных зародышей — мельчайших газовых пузырьков и нерастворенных примесей.

При дегазации алюминиевых сплавов немаловажную роль играют интенсивность ультразвука и материал, из которого сделан излучатель ультразвуковых колебаний. Материал должен сам обладать способностью вступать в соединение с водородом, или, как говорят, быть гидридообразующим. Между тем известно, что таким свойством обладают титан и другие химические элементы этой группы. Титан, введенный в расплав даже в очень небольшом количестве (0,005 процента), поглощает много водорода.

Использование инструмента из титана, ниобия, молибдена при дегазации алюминия или его сплавов желательно и по другой причине. Поскольку поверхность излучателя ультразвуковых колебаний, введенного в жидкий металл, под воздействием кавитации разрушается, то это на первый взгляд вредное явление можно обратить в полезное, подобрать соответствующий материал для излучателя. Титан, ниобий, молибден или какие-либо другие элементы, переходя из инструмента в расплав и равномерно распределяясь по всему объему расплава, придают ему те свойства, которые нужны, желательны.

Разработанный в Советском Союзе новый технологический процесс дегазации алюминиевых сплавов ультразвуком нашел широкое применение. Центральным научно-исследовательским институтом технологии машиностроения разработаны ультразвуковые дегазаторы серии УЗД. Принцип действия их одинаков, различие состоит только в конструктивном исполнении и производи-

тельности. Один из промышленных ультразвуковых дегазаторов, а именно УЗД-200М, обрабатывает алюминиево-магниевые расплавы в тигле или ковше емкостью 50—200 килограммов. Головка дегазатора состоит из четырех магнитострикционных преобразователей. Другой промышленный дегазатор — УЗД-300 — выполнен на восьми преобразователях.

Одной из новых областей применения ультразвука является процесс кристаллизации, определяющий качество готовых деталей, особенно таких, которые получают методом литья. Если расплавленный кристаллизирующийся металл обработать ультразвуком, произойдет измельчение зерен, уменьшится пористость, а структура отливки будет более равномерной. Впервые идею механического «встряхивания» расплава для улучшения качества металла при его кристаллизации высказал известный русский металлург Д. К. Чернов. В 1935 году С. Я. Соколов предложил воздействовать ультразвуком на процесс затвердевания расплавленных металлов.

Опытами установлено, что механическая вибрация, сообщенная расплаву в процессе затвердевания, улучшает его свойства. Механические колебания звуковой и особенно ультразвуковой частоты оказывают наибольшее воздействие, так как, кроме механического встряхивания, на кристаллизующийся расплав накладывается ряд физических воздействий, способствующих измельчению литой структуры, что имеет большое значение для получения материалов с улучшенными физико-химическими характеристиками.

У отливок, обработанных ультразвуком в процессе кристаллизации, значительно повышаются механические свойства. Чугун, например, становится прочнее, сопротивление разрыву возрастает более чем в три раза. Кроме того, после такой операции металл почти не поддается коррозии. Важно, что обработанный таким образом чугун приобретает свойства стали, а по некоторым данным даже превосходит ее.

Ультразвук применяется и при обработке металлов и сплавов в твердом состоянии. Он улучшает физико-механические, технологические и эксплуатационные свойства металлов и сплавов и ускоряет процессы термической и химико-термической обработки. Когда производят закалку, ультразвуковые колебания повышают охлаждающую способность закалочной жидкости, разрушают паровую

рубашку, возникающую вокруг закаливаемой детали, а также повышают механические свойства и прокаливаемость стали. Закалке с помощью ультразвука поддаются не только стали, но и твердые сплавы, при этом значительно повышается их прочность.

Все бо́льшее значение в промышленности приобретает порошковая металлургия. Детали различных машин, полученные под очень большим давлением из металлического порошка, не требуют дополнительной механической обработки — они сразу поступают на сборку. Небольшая доза ультразвукового облучения в процессе переработки металлического порошка намного повышает физико-механические свойства «спекаемых деталей». Крупинки металла под воздействием ультразвуковых колебаний как бы «встряхиваются», каждая из них находит свое место в общей массе, плотно прилегает к соседним. Естественно, что после этого отпадает необходимость уплотнять порошок слишком высоким механическим давлением.

Повышение производительности труда в машиностроении, металообработке и многих других областях промышленности во многом зависит от уровня инструментального производства, от широкого применения алмазов. Но алмазы очень дороги. К тому же долгое время возможности алмаза полностью не использовались, так как не было хорошей связки зерен алмаза с металлом инструмента. При повышенных нагрузках алмаз крошится, не успевая сработаться и на 30 процентов.

В разрешении инструментальной «алмазной» проблемы большую роль сыграл ультразвуковой метод получения сплавов. По этому методу металлурги стали получать синтетические дисперсные сплавы, обладающие надежной металлической связкой. В инструменте из таких сплавов алмаз держится прочно, не крошится и при эксплуатации срабатывается почти до конца. Ультразвуковой метод получения металлической связки позволил применить алмазные инструменты для обработки различных материалов, включая такие, как жаропрочная сталь, твердые сплавы, чугун, неметаллические изделия из феррита, фарфора, стекла и т. п.

Каждый знает, что трение — «больное место» машиностроителей и эксплуатационников. В борьбе с ним используются многие средства, прежде всего смазка. Можно представить себе, сколько различных смазочных

материалов нужно для удовлетворения нужд современного машинного парка в промышленности, на транспорте и т. д. Совершенно очевидно, что создание материалов, не требующих смазки,— насущная задача. Поиски здесь ведутся во многих направлениях. Одно из них — сделать самосмазывающимися материалы, которые давно используются в машиностроении для изготовления втулок, подшипников. Например, пропитать бронзу графитом. Но задача эта не простая, и тем не менее ее удалось решить благодаря ультразвуку. Он смог соединить между собой эти полярные вещества. Так удалось создать материал, обладающий отличными антифрикционными свойствами. Детали из него, например, на тепловозах работают в 10 раз дольше, чем прежние углеграфитные уплотнения. Точно таким же методом удалось получить еще один антифрикционный материал. Его «составили» из алюминия и свинца (до одного процента ко всей массе вновь полученного материала). Свинец, введенный в сплав обычными методами, сохраняет самостоятельность и не вступает в химические соединения. При ультразвуковой технологии свинец в считанные минуты равномерно распределяется по всему объему алюминия. Изготовленные из такого материала подшипники намного устойчивее в работе. Переход на новые подшипники позволит сэкономить много средств. Полученный антифрикционный материал очень перспективен, особенно в устройствах и агрегатах, где подшипники испытывают огромные нагрузки и где нужна высокая точность.

УЛЬТРАЗВУК В ГОРНОРУДНОМ ДЕЛЕ

Начало использования метода ультразвуковой геолокации относится к 40-м годам, когда при морских работах с эхолотами было обнаружено, что в некоторых случаях, помимо рельефа дна моря, на эхограммах регистрируется толщина донных осадков и их строение.

С каждым годом сфера применения ультразвука в горном деле расширяется. Ультразвуковая аппаратура ныне заняла уже видное место в арсенале средств как практической, так и теоретической геологии.

«Собирать по крупинкам» — это выражение пришло в русский язык от золотоискателей. Их изнурительный

труд на промывке золотоносного песка вознаграждал всего лишь маленькой крупицей благородного металла. Да и орудия производства у них были примитивными: лопата, кирка, лоток. Сейчас все иначе — работают современные механизмы, но и они не могут решить все вопросы. Например, как узнать, сколько еще осталось золотоносного песка при разработке дренажных котлованов? Раньше такие измерения делали с помощью специальной рейки. Ориентировочность подсчетов существенно сказывалась на производительности оборудования и стоимости разработки. Теперь такие измерения делают методом звуковой и ультразвуковой геолокации.

В Горном институте имени Г. В. Плеханова разработан ультразвуковой прибор для «просматривания» дна дренажных котлованов, залитых водой. Прибор определяет не только глубину котлованов, но и слои рыхлого песка до подстилающего грунта.

Ультразвук приняли на вооружение в горнорудной и угольной промышленности. Ультразвуковые колебания значительно ослабляются при распространении в пластах каменного угля и несравнимо меньше — при распространении в породах, сопутствующих каменному углю, таких, как глинистый сланец, песчаник, известняк. Ультразвуковое устройство помогает отличать уголь от других горных пород, между которыми находится угольный пласт. Это устройство позволяет автоматизировать процесс добычи угля в шахтах, судить не только о составе пород, угля, но и определять границы пласта, наличие трещин и посторонних включений.

Для разведки угольных пластов применяют ультразвуковой датчик «уголь — порода». Ультразвуковые колебания частотой 50 килогерц, возбужденные в излучателе, через концентратор передаются в исследуемую породу в виде сферических продольных и круговых поверхностных волн. Достигая приемника, они возбуждают в нем колебания, и в обмотке наводится электродвижущая сила. Интенсивность колебаний, достигших приемника при неизменном расстоянии между ним и излучателем, зависит от упругих характеристик и физического состояния среды. По величине электрического сигнала в приемнике, то есть по отклонению стрелки на индикаторе, можно судить об упругих свойствах среды, а следовательно, обнаруживать угольные пласты.

Измерения в лабораторных условиях, а также непосредственно в условиях залегания горных пород производятся с помощью сейсмоскопов УЗС-2, ИПА-59, УЗС-2-60, ЛС-1, ЛС-2 и др. Более совершенны и обладают лучшими характеристиками сейсмоскопы типа ЛС.

Нефтяники тоже использовали акустические методы при поисках нефти и газа. Делается это так. В предполагаемом районе залегания полезных ископаемых производят взрыв. Распространяясь в земной коре, звуковые и ультразвуковые волны проходят различные ее слои. В некоторых слоях волны поглощаются, от других участков они отражаются и возвращаются к приемникам, установленным на поверхности земли. На пленке самописца записывается информация о составе и строении исследуемого участка земной поверхности. Эта информация дает возможность судить о наличии или отсутствии здесь залежей нефти и газа. Метод звукоразведки все время совершенствовался. Прежде, например, на расшифровку пленки самописца уходило много времени. Теперь это делает автоматическая аппаратура. Она быстро расшифровывает кодограмму и выдает необходимую информацию.

Для определения давления газа непосредственно в стволе работающей скважины используют ультразвуковой глубинный прибор УГП-1. Интересующее специалистов давление автоматически записывается на электротермическую бумагу при спуске прибора в скважину и во время подъема. Рабочая частота прибора 5,6 мегагерца; режим работы импульсный, рабочее давление 309,96 кгс/см^2.

В Куйбышевском институте Гипровостокнефть разработали ультраакустический метод исследования нефти, взятой на больших глубинах, и разработали ультразвуковой прибор, с помощью которого определяется давление насыщения забойной нефти. Точность определения этого важнейшего параметра значительно возросла и требуется всего 10 минут вместо 5—6 часов, как это было прежде.

В нефти содержится парафин. Он откладывается на стенках подъемных труб, в результате чего производительность скважины снижается. Чтобы предупредить отложение парафина, применяют несколько методов. Наиболее простой и перспективный из них — ультразвуковой.

Ультразвуковые колебания вызывают колебания молекул нефти, что приводит к ее разогреву. А это в свою очередь предотвращает откладывание парафина на стенках труб. Процесс обработки ультразвуком может быть непрерывным или периодическим.

Непременным технологическим элементом бурения скважин на газ или нефть является глинистый раствор. Его нагнетают в скважину под большим давлением и таким образом «вымывают» из нее раздробленную породу. Раствор должен иметь постоянную консистенцию. Особенно опасен загустевший раствор: тогда он способствует образованию вязких пробок, а это уже ЧП — чрезвычайное происшествие. Как правило, такую пробку бывает трудно ликвидировать, да и времени на это уходит много. Глинистый раствор предотвращает также обвалы при проходке скважин в неустойчивых породах. Словом, от его качества зависит многое. Чем лучше глинистый раствор, тем короче сроки получения нефти из уже готовых скважин. Обычно необходимые качества ему придают с помощью химических реагентов. Но это дорого и не всегда удается улучшить все показатели. На кафедре бурения нефтяных и газовых скважин Куйбышевского политехнического института для приготовления глинистого раствора применили ультразвук. Была изготовлена установка, в которой глинистый раствор хорошо перемешивается и становится устойчивым к загустению.

На этом не ограничиваются области использования ультразвука в угольной, нефтяной и горнорудной промышленности. Горняки, например, применили ультразвук для борьбы с концентрацией метана у кровли горных выработок. В качестве излучателя была использована сирена, создающая мощные ультразвуковые колебания. Поток ультразвуковых волн, направленных навстреду движущемуся метановому потоку, вызывает продольные колебания частиц газа. В результате частицы метана под воздействием ультразвукового поля рассеиваются, что и приводит к уничтожению взрывоопасного слоя или скопления.

Некоторые руды бедны ценными компонентами и не могут без обогащения быть сырьем для химических и металлургических заводов. В измельченной руде обычно содержится один-два процента металла, а в обогащенной — в десять, а то и в двадцать раз больше. Сотруд-

ники Института обогащения и металлургии Академии наук Казахской ССР разработали ультразвуковой способ обогащения руд цветных металлов. Суть его в том, что под воздействием ультразвуковых колебаний мельчайшие капельки химических реагентов — собирателей — обволакивают частицы полезных минералов, делая их несмачиваемыми, вместе с пузырьками воздуха они потом всплывают на поверхность. Верхний слой пульпы снимают и, пропустив через фильтры, направляют на металлургический завод для выплавки металла.

Ультразвуковой метод обогащения руд можно использовать не только при выплавке цветных металлов. Перспективы применения ультразвука в процессах обогащения довольно заманчивы. Известно, что механизация добычи угля при общем положительном эффекте приводит к некоторым отрицательным последствиям, в частности много угля крошится, превращается в пыль. Вот и возникла необходимость в ее обогащении, чтобы не допустить расточительного отношения к ценнейшему природному топливу.

Существуют два способа обогащения — флотационный и ультразвуковой. Преимущество второго в том, что он экономически более выгоден. В его основе лежит уже упоминавшееся в книге явление коагуляции, сам способ так и называется — обогащение способом избирательной коагуляции. Ультразвуковые колебания вызывают коагуляцию, то есть слипание или укрупнение угольных зерен, в то время как зерна пустой породы не слипаются, а следовательно, и не увеличиваются в размерах. На специальных решетчатых приспособлениях отделяют уголь от породы.

Горняки применили ультразвук для контроля карбонатных пород сырья в цементной и других отраслях промышленности. Применяемые в настоящее время химические и иные методы контроля требуют значительных затрат и средств при ограниченном количестве проб. Ультразвуковой импульсный метод в этом плане имеет несомненные преимущества — он более точен и производится гораздо быстрее. По характеру распространения ультразвуковых волн можно судить о свойствах пород, их внутренней структуре и происходящих в ней изменениях. Преимущества ультразвукового метода перед другими заключаются в том, что образцы не разрушаются,

испытания проводятся быстро с немедленным получением результатов. Кроме того, испытания можно повторять многократно, что придает особую достоверность полученным результатам.

Новое применение ультразвуку нашли геофизики. Они предложили использовать звуковые и ультразвуковые волны для обнаружения подземных пустот. Люди, обживая планету, все глубже проникают в недра. Из года в год растут их подземные владения — рудники, шахты, трассы метрополитена. Тут возможны всякие неожиданности — обвал в шахте, проседание грунта в подземном коридоре и т. д. Подобные неприятности бывают чаще всего из-за наличия пустот в земных толщах, форма которых напоминает обычно шляпку гигантского гриба. Сферический свод со временем трескается и разрушается, а в итоге — обвал. Как же обнаружить пустоты? Привычный и давно используемый способ — бурение, а это трата времени и средств, удорожание строительства. Вот почему идея ультразвуковой и звуковой геолокации пришлась как нельзя кстати. На поверхности земли исследуемого участка устанавливают несколько чувствительных пьезоэлектрических приемников с пультом управления и индикаторным устройством. В стороне от установки взрывают на некоторой глубине небольшой заряд. Звуковые волны пронизывают толщу земной коры, отражаясь от различных пород. Приемное устройство фиксирует отраженные волны на магнитной ленте и фотобумаге. В пустоту звуковые волны попадут, как в ловушку, и назад не вернутся, стало быть, приемное устройство никакой записи не сделает (или если и сделает, то так, что тоже должна будет насторожить исследователей). Обнаруженную пустоту в толще земли можно либо ликвидировать, закачав в нее воду вместе с пустой породой шахтных и горных выработок, либо превратить в хранилище газа.

Размеры подземных камер и пещер ученые высчитывают лишь теоретически. Специалисты одного из ленинградских институтов впервые создали ультразвуковой локатор «Луч», который быстро и точно определяет размеры пустот на соляных разработках. Прибор опускают в подземную выработку, где он излучает ультразвуковые волны. Распространяясь, волны отражаются от стенок подземной емкости и затем принимаются специальным

регистрирующим устройством. Прибор автоматически ведет съемку, записывает и передает данные о горизонтальном сечении полости.

УЛЬТРАЗВУК В РАДИОЭЛЕКТРОНИКЕ

Образно говоря, наш век — это век бурно развивающихся радиоэлектроники, полупроводниковой и вычислительной техники. Появляются в огромном количестве портативные и миниатюрные радиотехнические устройства. Но как, например, припаять проволоку в несколько раз тоньше человеческого волоса к крохотному радиоэлементу? Как сделать механические крепления деталей и узлов из полупроводников, керамики, феррита, кварца, абразива и других материалов? Метод вжигания серебра обладает высокой трудоемкостью, и получается недостаточная механическая прочность. Кроме того, расходуется драгоценный металл. Теперь эти операции выполняет луч лазера и ультразвук. В Советском Союзе и других странах для этой цели созданы ультразвуковые установки с микроманипуляторами и стереомикроскопами.

В радиоэлектронике, в частности в радиолокации и особенно в вычислительной технике, часто возникает необходимость задержать один электрический сигнал относительно другого. Эту задачу можно решить, если один из сигналов пустить по обходному пути, то есть по очень длинному кабелю. Но практически это трудно выполнимо и нецелесообразно, так как потребуется очень много кабеля. Удачное решение нашли ученые, предложив ультразвуковые линии задержки. Действие их основано на преобразовании электрических импульсов в импульсы ультразвуковых механических колебаний, скорость распространения которых значительно меньше скорости распространения электромагнитных колебаний. После обратного преобразования механических колебаний в электрические импульс на выходе линии будет задержан относительно входного импульса на время, величина которого зависит от линии задержки, а точнее, от длины участка линии задержки.

Преобразования электрических колебаний в механические и обратно основаны на явлениях магнитострик-

ции и пьезоэлектричества. Соответственно этому преобразователи и ультразвуковые линии задержки подразделяются на магнитострикционные и пьезоэлектрические.

Магнитострикционная линия задержки состоит из входного и выходного преобразователей, магнитов, звукопровода и поглотителей. Главный элемент преобразователя сделан из ферромагнитных материалов, способных изменять свои размеры под воздействием магнитного поля. Схематично работа линии задержки сводится к следующему: механическое возмущение, вызванное магнитным полем катушки входного преобразователя, передается по звукопроводу и, дойдя до катушки выходного преобразователя, наводит в нем электродвижущую силу. Основное преимущество магнитострикционной линии состоит в простоте съема импульсов с различными временными задержками. Это достигается установкой на нужных расстояниях нескольких приемных катушек. Кроме того, можно плавно изменять величину задержки сигнала.

Пьезоэлектрические линии задержки устроены следующим образом. На пути электрического сигнала, который нужно задержать, ставят пьезоэлектрический преобразователь (пластинку кварца), который жестко соединен с металлическим или другим стержнем (звукопроводом). Ко второму концу стержня прикреплен еще один пьезоэлектрический преобразователь. Сигнал, подойдя к первому входному преобразователю, вызывает механические колебания ультразвуковой частоты, которые затем распространяются в звукопроводе. Достигнув второго преобразователя, ультразвуковые колебания вновь преобразуются в электрические и дальше продолжают свой путь. Вся суть сводится к разнице в скоростях распространения звука и электричества. Понятно, что время задержки сигнала зависит от длины звукопровода и что, изменяя эту длину, можно изменять и время задержки.

Звукопроводами могут быть твердые и жидкие тела. Из твердых тел чаще используют магниевые сплавы, а из жидких — ртуть. Звукопроводы из магниевого сплава длиной один сантиметр позволяют получить задержку сигнала на 1,7 микросекунды. Ртутный звукопровод при такой же длине задерживает сигнал на 6,7 микросекунды. Иногда для увеличения времени в линиях с твердым звукопроводом используются многократные отражения

сигнала. Еще большие величины задержек можно получить, если вместо продольных волн использовать поперечные. При этом размеры линии задержки значительно уменьшаются.

Однако проблема не решена окончательно. Дело в том, что сигнал после двух преобразований перед звукопроводом и после него ослабевает в тысячи раз. Следовательно, нужны дополнительные устройства для усиления сигналов, а это невыгодно. Поэтому ученые и предложили в ультразвуковых линиях задержки применять для звукопроводов материалы, обладающие пьезоэлектрическими и полупроводниковыми свойствами (кварц, хлористый натрий).

Если к полупроводниковому пьезокристаллу приложить постоянное электрическое поле такой величины, чтобы скорость движения электронов превышала скорость ультразвуковой волны, то амплитуда последней будет возрастать по мере движения волн вдоль стержня. В этом случае наряду с задержкой по времени сигнал намного усилится. Таким образом, ультразвуковая линия задержки с пьезоэлектрическим звукопроводом является одновременно и усилителем.

Опыты показали, что при определенной длине стержня акустического усилителя можно усилить ультразвуковые колебания в десятки тысяч раз. Вот почему такое большое внимание ныне уделяется исследованиям в области полупроводниковых и пьезокристаллических ультразвуковых усилителей.

В Институте радиотехники и электроники Академии наук СССР разработана активная ультразвуковая линия задержки. Принцип ее действия основан на использовании явления усиления ультразвука «дрейфом» электронов в твердых телах. Усиление возникает из-за взаимодействия электронов с кристаллической решеткой. Особенно эффективно это взаимодействие в материалах, обладающих пьезоэлектрическими свойствами. Благодаря такому взаимодействию ультразвуковой волне передается энергия потока электронов, когда скорость их «дрейфа» в кристалле превышает скорость распространения ультразвука. Электромагнитные колебания преобразуются электромеханическим преобразователем в ультразвуковые. Возникшая ультразвуковая волна распространяется через звукопровод и активный элемент, в котором происходит ее усиление, и затем снова преобра-

зуется с помощью выходного электромеханического преобразователя в электромагнитные колебания, но уже задержанные по времени. Ультразвуковая линия задержки работает на частоте 52 мегагерца, время задержки 15 микросекунд.

Не менее интересной и перспективной представляется проблема усиления радиосигналов с помощью ультразвука. В Акустическом институте Академии наук СССР создан прибор, который работает на основе взаимодействия электронов с ультразвуковой волной. Если через пьезоэлектрический кристалл в одном и том же направлении пропустить ультразвуковую волну и электрический ток, то на выходе мы получим усиленный ультразвуковой сигнал. Один сантиметр длины пьезоэлектрического кристалла позволяет получить усиление в сотни миллиардов раз. Вот именно это явление и можно, оказывается, использовать для усиления высокочастотных радиосигналов. Для этого радиосигнал нужно сначала преобразовать в ультразвуковой, усилить его, а затем вновь преобразовать в радиосигнал. Конечно, на всех этапах преобразования какая-то часть мощности теряется, и тем не менее этот метод усиления превосходит по эффективности метод усиления с помощью вакуумных ламп.

Ультразвук, как и электромагнитные волны, теперь можно обрабатывать радиотехническими способами — генерировать, усиливать, модулировать, выпрямлять, фильтровать и т. д. А это открывает перед ультразвуком большие перспективы в области связи. В среде, где невозможно использовать радиоволны, например под водой, на помощь приходят усилители ультразвука. Так на стыке двух наук — ультраакустики и радиоэлектроники — возникло новое направление — акустоэлектроника.

Появились новые устройства — квантовоакустические усилители. Они настолько перспективны, что ими заняты сейчас большие научные силы. Интересный эксперимент в области квантовой акустики выполнил американский физик — один из изобретателей оптического лазера. Он показал, что кристалл, на который направлен пучок света от сверхмощного светового лазера, начинает звучать на очень высоких частотах. Таким образом, открыта еще одна возможность преобразования световых колебаний в ультразвуковые без «посредника» — электричества.

Применение усиленного ультразвука при исследовании взаимодействия электронов с упругими волнами помогает

раскрыть новые, ранее неизвестные свойства вещества. Например, исследуя сульфид кадмия, ученые обнаружили необычное явление — волнообразный перенос тепла в твердом теле. Его можно представить как волнообразное изменение температуры, распространяющееся вдоль кристалла в направлении распространения ультразвука. Если же освещать кристалл сульфида кадмия и одновременно пропускать через него ультразвуковые колебания, то возникающее электрическое поле создаст электродвижущую силу вдоль направления распространения волны. Во время экспериментов был получен ток напряжением более 100 вольт.

Во многих странах разрабатываются акустические усилители высокочастотных сигналов. Американские ученые, в частности, предполагают использовать их в качестве усилителей промежуточной и высокой частоты, усилителей с ограничением амплитуды сигнала, а также линий задержки сверхвысокочастотных сигналов без потерь. Действие таких усилителей основано на пьезоэлектрическом преобразовании электромагнитных колебаний в ультразвуковые, усилении ультразвуковых колебаний и на преобразовании усиленных ультразвуковых колебаний в электромагнитные. В качестве преобразователей используются пластины кварца. Зарубежные специалисты считают возможным применять для этой цели соединения из элементов III и V групп Периодической системы элементов Менделеева (фосфид галлия, арсенид индия, фосфид бора).

Усовершенствование вычислительных машин — процесс безостановочный и непрерывный. Более того, процесс все более и более ускоряющийся, подгоняемый, с одной стороны, потребностями практики, а с другой — самим научно-техническим прогрессом. Одно из основных, даже, можно сказать, главных направлений совершенствования «умных» машин — это повышение их так называемого быстродействия. Уже сменилось несколько поколений этих машин, и каждое новое поколение отличалось от предыдущего прежде всего быстродействием («прежде всего» — это никак не означает, что не менялись и все другие качества и параметры, такие, как объем памяти, потребляемая мощность, габариты и т. д.). Добиваясь повышения быстродействия, создатели «умных» машин пришли к идее использования оптических систем, которые позволяют производить расчеты со ско-

ростью света, то есть практически мгновенно. Оптические машины превосходят электронные примерно настолько, насколько электронно-вычислительные по своим возможностям превосходят человека.

Казалось бы, что делать в таких машинах ультразвуку по сравнению со светом в буквальном смысле тихоходу? Между тем дело нашлось: ему можно поручить роль «посредника» между электрическим током и светом. Из плавленого прямоугольного кварцевого стержня делают входной преобразователь оптической системы, к которой прижаты пьезоэлектрические кристаллы. Они преобразуют электрический ток в механические колебания, которые возбуждают в кварцевом стержне ультразвуковые волны. В такт ультразвуковым колебаниям изменяется способность кварца преломлять свет. Перемена коэффициента преломления фиксируется оптической системой, и на ее выходе (фотопластинке) появляются темные и светлые места. Фотопластинку с записанным ответом нужно проявить, но это процесс несложный, к тому же его можно выполнять независимо от дальнейшей работы машины.

Возросшая роль акустических методов исследования твердого тела и широкое распространение методов ультразвуковой интроскопии и дефектоскопии вызывают необходимость интенсивности ультразвуковых колебаний в широком диапазоне частот. Однако на очень высоких частотах величины смещений в твердых телах столь малы, что их непосредственное измерение затруднено. Поэтому на высоких частотах обычно используются различные косвенные методы измерения интенсивности ультразвуковых колебаний. Наиболее эффективный из них — акустоэлектрический метод.

В Институте радиотехники и электроники АН СССР разработан акустоэлектрический детектор ультразвука на основе фотопроводящих кристаллов. Ультразвуковая волна, распространяясь в некоторой среде, попадает на акустоэлектрический приемник, представляющий собой нужным образом ориентированный кристалл, а затем поглощается в специальном устройстве (поглотителе). Образующееся на выходе акустоэлектрического приемника напряжение регистрируется индикатором. Простота измерений, высокая чувствительность, линейность в широкой полосе частот позволяют использовать акустоэлектрический детектор ультразвука для исследования

амплитудно-частотных характеристик электромеханических преобразователей. Ультразвуковой детектор на основе акустоэлектрического эффекта сочетает в себе высокую чувствительность, простоту и удобство измерений.

Звуковые и ультразвуковые устройства в комплексе с радиоэлектроникой наряду с многочисленными новинками в области науки и техники находят себе место и в исследовании космоса. Так, например, на орбитальных станциях «Салют» в панелях, выполняющих роль датчиков, использовался акустический принцип. Удар микрочастиц регистрировался и замерялся по системе звуковых колебаний, а затем по радиоканалу данные передавались на наземные пункты управления.

Ультразвук проник и в бытовую радиоэлектронику. В некоторых моделях современных телевизоров ультразвук использовали для беспроводного дистанционного управления. Небольшой ультразвуковой пульт, умещающийся на ладони, позволяет не только включать и выключать телевизор на расстоянии до 6 метров, но и регулировать яркость изображения и громкость звука, а также переключать программу передач. Ультразвуковой дистанционный пульт может управлять и магнитофоном.

УЛЬТРАЗВУК В СЕЛЬСКОМ ХОЗЯЙСТВЕ

Два поля имели общую границу и были засеяны одними и теми же сортами помидоров. Одинаковыми были также нормы удобрений, поливов, сроки и количество произведенных работ. Но на одном поле кусты растений разрослись сильнее, плодов было больше, созрели они быстрее, да и витаминами оказались намного богаче, чем плоды с соседнего поля. А все дело в том, что перед посевом его семена были обработаны ультразвуком. Вначале ученые изучали, как влияет ультразвук на биологическую природу растений. Они проделали многочисленные опыты и установили, что в «озвученных» семенах растений резко повышается активность ферментов. Ультразвук изменяет структуру молекул и аминокислот, ускоряет процессы окисления. В Узбекском научно-исследовательском институте овощебахчевых культур и картофеля после многочисленных опытов и исследований установили, что обработка семян дыни и кукурузы

ультразвуком в отдельных случаях повышает урожайность на 40 процентов. Подобные опыты были проделаны с капустой, луком и морковью.

Хорошие результаты дает применение ультразвука в хлопководстве. Уже давно известно, что хлопчатник выгодно сеять оголенными семенами, в результате чего посевная норма сокращается в несколько раз. Но оголение семян хлопчатника — кропотливая, отнимающая много времени операция. Если же семена облучить ультразвуковыми колебаниями, то они оголяются значительно легче и быстрее. Одновременно с этим ультразвук хорошо стимулирует рост и развитие хлопчатника. Важно и то, что хлопчатник, выросший из семян, обработанных ультразвуком, не поддается заболеванию многими болезнями, устойчив к ядохимикатам, в частности к гербицидам. Для комплексной обработки хлопковых семян создана ультразвуковая установка, которая всю операцию проделывает за пять минут. При обработке семян ультразвуком в них можно ввести нужные микроэлементы. В результате полностью уничтожаются возбудители болезней и вредители, активизируются ферменты, заметно повышаются энергия прорастания и устойчивость семян к холоду. Все это благоприятно сказывается на последующем развитии и урожае хлопчатника.

Ультразвук стали использовать в животноводстве для определения упитанности убойного скота. Это делается, как правило, «на глазок», приблизительно, из-за чего нередко возникают споры и конфликты между сдатчиками и заготовителями, а самое главное — снижается экономическая эффективность откормки животных. Сотрудники Донского сельскохозяйственного института совместно с инженерами завода «Электроточприбор» разработали и изготовили ультразвуковой прибор для оценки упитанности живых свиней в соответствии с государственным стандартом. Если свинья тощая — загорается красная лампочка, средней упитанности — фиолетовая, жирная — белая. Сдатчик и приемщик вместе наблюдают за прибором.

Ультразвуковая аппаратура поступила также на вооружение работников ветеринарных служб. Так, например, ультразвуковыми приборами УДА-724 и УДА-871 можно надежно диагностировать нормальную и осложненную беременность у животных, определять положение плода и следить за его развитием. Имеется также

ультразвуковой аппарат для лечения животных и проведения некоторых биологических исследований. Аппарат портативен, снабжен приспособлениями дозировки ультразвукового излучения, дистанционным управлением и набором ультразвуковых головок различного назначения.

Наконец, борьба с вредителями сельского хозяйства, от которых оно до сих пор, к сожалению, несет большие потери. Чем тут может помочь ультразвук? Известно, что основных способов уничтожения вредных насекомых, крадущих у земледельцев значительную долю урожая, два: химический и биологический. Особенно большие перспективы у биологического способа, который, по всей видимости, займет значительное место в новой отрасли народного хозяйства — биотехнологии. Думается, однако, что и ультразвук не останется без работы как одно из направлений физических методов борьбы с сельскохозяйственными вредителями. Так, например, для борьбы с гусеницами кукурузного мотылька можно применить ультразвуковые колебания частотой 50 килогерц, напоминающие звуки, издаваемые летучими мышами,— врагами насекомых. Эти звуки заставляют гусениц покидать поля. Ультразвук можно применить и для борьбы с личинками комаров. Колебания с частотой 200 килогерц разрушают дыхательные органы личинок, и они погибают. На людей и животных эти колебания никакого вредного воздействия не оказывают, так как они имеют небольшую интенсивность.

УЛЬТРАЗВУК В ПИЩЕВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

В пищевой промышленности ультразвук применили для стерилизации, пастеризации и дезинфекции продуктов. Благодаря ультразвуковым колебаниям повышается качество пищевых продуктов и улучшаются технологические процессы их изготовления. В результате многочисленных опытов было установлено, что ультразвуковые колебания определенной частоты и интенсивности не только повышают сроки сохранности, но и улучшают качество молочных продуктов. Так, например, обработка молока ультразвуком позволяет значительно снизить содержание в нем вредной микрофлоры. Кислотность такого молока не повышается в течение пяти часов. При

этом вкус, запах и цвет не изменяются, сохраняется стойкость при перевозке и хранении.

Хранение молока в замороженном виде известно давно. Но известно и то, что после размораживания оно меняет вкус и консистенцию — выделяется жир, появляются хлопья... Если же пастеризованное молоко обработать ультразвуком, а потом заморозить, то его можно хранить длительное время, поддерживая температуру минус 12 градусов. Восстановленное, оно ничем практически не отличается от того, каким оно было до замораживания. Предложили этот способ хранения молока английские специалисты.

При выработке порошкового молока тоже применили ультразвук. Свежее молоко замораживают до минус 16 градусов, а затем обрабатывают ультразвуковыми колебаниями высокой частоты. Порошок, полученный таким способом, хранится дольше, чем порошок, полученный методом выпаривания. Кроме того, он изготавливается быстрее.

Хорошие результаты показал ультразвук на предприятиях, производящих животные и растительные жиры. В Грузии разработан ультразвуковой метод получения тунгового масла — ценнейшего материала в производстве красящих веществ. Семена тунга, обработанные ультразвуком, лучше набухают, и выход масла увеличивается почти на два процента.

Уже упоминалось о том, что благодаря ультразвуку можно получать эмульсии из несмешивающихся жидкостей. Это имеет огромное практическое значение для такой отрасли, как хлебопекарное производство, где благодаря масловидным эмульсиям, полученным с помощью ультразвука, почти на 90 процентов сокращается расход масла без ущерба для качества продукции. Это еще не все. Оказывается, что при обработке ультразвуком пекарных дрожжей в течение часа бродильная энергия их повышается в среднем на 15 процентов. В обработанных ультразвуком дрожжах повышается содержание эргостерина, являющегося сырьем для получения высокоактивного витамина D.

Экономически выгодно и эффективно применение ультразвука в кондитерской промышленности. Ультразвуковые колебания позволяют ускорить кристаллизацию сахарозы и получить однородную массу при изготовлении помадки. При этом качество готовой помадки повы-

шается. Под действием ультразвука улучшаются специфические и вкусовые качества шоколада и значительно сокращается продолжительность его обработки в отделочных машинах. Известно также, как опасна сахарная пудра. Достаточно одной искры, чтобы вся масса мельчайших пылинок сахара взорвалась. Поэтому в сахарном производстве вынуждены соблюдать строжайшие правила техники безопасности. Ученые предложили сахарную пудру заменить сахарной эмульсией, приготовленной с помощью ультразвуковой установки. Такие установки уже применяются на кондитерских фабриках и других предприятиях. Они очень производительны и экономичны, а главное, безопасны.

Заслуживает внимания применение ультразвука в мясной и птицеперерабатывающей промышленности для получения эмульсий животных жиров, ароматических эмульсий, специй и для посола мяса. На некоторых мясокомбинатах ультразвуком обрабатывают фарш при изготовлении сосисок, сарделек и вареной колбасы. Эмульсия из воды и жира соединяется с фаршем, в результате чего колбасные изделия получаются более сочными. Ультразвуковые жировые эмульсии позволяют отказаться от выдержки мяса в посоле и более точно регулировать содержание в фарше жира и воды. Посол мясопродуктов продолжается не менее 15 суток, а отдельных видов мясных изделий до 60 суток, что затрудняет перевод технологических процессов на поточное производство. Ультразвук позволил ускорить процесс посола, под его воздействием засолка идет быстрее, соль в тканях мяса распределяется более равномерно, а цвет его приобретает равномерную розовую окраску.

Ароматические вещества раньше добавлялись в виде порошка, сейчас вводятся в виде экстрактов. Экстракты удобнее и дешевле порошкообразных специй — один килограмм экстрактов заменяет 30 килограммов порошкообразных специй. Но равномерное распределение в фарше незначительных количеств специй практически невозможно. И только благодаря ультразвуку удалось получить стабильные эмульсии, которые даже через две недели не теряют своих ароматических свойств. Такие эмульсии могут использоваться и в консервной промышленности, так как не вызывают коррозии банок.

В консервной промышленности ультразвуки применили для приготовления овощных консервов — пюре.

Ультразвуковые колебания позволяют очень тонко и равномерно измельчать овощи. Овощное пюре, приготовленное с помощью ультразвука, легче усваивается и обладает хорошими вкусовыми качествами. Особенно это важно при производстве консервов для детей и больных, которым необходима строгая диета.

Важное место ультразвук занял в рыбной промышленности, а в некоторых процессах он просто незаменим. Ультразвуковые колебания ускоряют, в частности, извлечение жира из рыбьей печени, благодаря чему повышается качество медицинского рыбьего жира, в нем сохраняются ценные для человека витамины *A* и *D*.

Что, кажется, может быть проще приготовления виноградного сока: выжми из ягод сок и дай ему отстояться. На деле, однако, все обстоит иначе.

Свежий сок — это перенасыщенный раствор винного камня. Достаточно слегка охладить сок, а иногда просто встряхнуть его, как немедленно выпадают кристаллики соли. Никакой фруктовый сок не доставляет производственникам столько хлопот, сколько виноградный. Сейчас его интенсивно облучают ультразвуковыми колебаниями, которые в десятки раз ускоряют выпадение винного камня. Используют ультразвук и при отжимании сока, так как он быстро разрушает органическую ткань. При облучении виноградных ягод ультразвуком часть мякоти, которая раньше шла в отход, перерабатывается в чистый виноградный сок, что увеличивает выход сока на 8 процентов.

Опыты показали, что ультразвук ускоряет экстрагирование горьких веществ из хмеля, способствует лучшему сохранению в нем ароматических веществ. Применение ультразвуковых установок на пивоваренных заводах позволяет значительно сократить расход хмеля.

При существующей технологии производства чая не обеспечивается максимальное использование сырья, так как при скручивании чайного листа одна четверть клеток не подвергается биохимическим превращениям и поэтому не участвует в образовании вкусовых и ароматических свойств. Применение же ультразвука позволяет разрушить все оболочки зеленого чайного листа.

Духи, как известно, «созревают» месяцы, а иногда даже годы. Настои выдерживают в цистернах, занимающих большие производственные площади. Инженеры Харьковской парфюмерно-косметической фабрики сов-

местно с сотрудниками Украинского научно-исследовательского института пищевой промышленности применили ультразвук для ускорения процесса изготовления духов, ультразвуковая установка обеспечивает созревание духов за 6—8 часов вместо года, как было раньше.

Эфиромасличные заводы нашей страны за год вырабатывали всего несколько килограммов розового масла, а теперь они получают тонны. Только крымскими заводами освоено и производится двадцать четыре вида эфирных масел. Биохимические исследования показали, что лепестки розы уже через два часа после снятия с бутона теряют четверть эфирного масла, а под лучами солнца оно уменьшается почти вдвое. Для увеличения сроков хранения лепестки розы помещают в соляные растворы, что повышает выход розового масла на 30—40 процентов. А для ускорения процесса экстрагирования и отделения масла от воды применяют ультразвук, под воздействием которого время, затрачиваемое на обработку лепестков, можно сократить в пять раз.

На пищевых предприятиях успешно применяются различные ультразвуковые установки. Так, для приготовления эмульсий растительных жиров при производстве твердых сыров применяют ультразвуковой гидродинамический диспергатор. Эмульгирование производится вихревыми многокамерными гидродинамическими излучателями. Производительность диспергатора 5 тонн в час. Для получения сахарной эмульсии предназначена ультразвуковая установка АГБ-3. В отличие от ранее применявшихся эта установка не требует предварительного размола сахарного песка в пудру. Составные компоненты загружаются в смеситель. Получаемая смесь через фильтр попадает к насосу и под давлением 12—15 атмосфер подается в эмульгатор. Проходя через многостержневой гидродинамический вибратор, эмульсия под действием интенсивных акустических колебаний становится стойкой и мелкодисперсной. Производительность установки 400—600 килограммов в час.

УЛЬТРАЗВУК В БИОЛОГИИ

Поместим каплю воды с простейшими живыми организмами — гидрами — под микроскоп, затем нанесем на стекло еще одну каплю и облучим ее ультразвуком. Потом аккуратно иглой соединим капли, чтобы «озвученная» вода соединилась с «неозвученной». Гидры немедленно среагируют на это: их щупальца начнут беспорядочно двигаться. Через некоторое время кончики щупалец отомрут и распадутся, а на пятнадцатой примерно минуте гидры превратятся в бесформенные мертвые комочки. Почему? Оказывается, в «озвученной» воде образуются сотые доли процента азотной кислоты. Ни на вкус, ни по запаху обнаружить такую ничтожную примесь невозможно. Однако изменение кислотности воды оказывается достаточным, чтобы нарушить процессы обмена веществ в микроорганизме. Уничтожающее действие на бактерии оказывают и кавитационные пузырьки, вблизи которых возникают импульсы огромных давлений.

Ультразвук отрицательно влияет на многие простейшие живые организмы. Например, большие дозы ультразвука разрывают и уничтожают инфузории и даже такие стойкие микроорганизмы, как туберкулезные палочки. Под действием ультразвука в течение часа снижается активность вирусов гриппа в тысячи раз, а такие бактерии, как стафилококки, стрептококки, вирусы энцефалита и некоторые другие, уничтожаются полностью. Разрушение микроорганизмов наблюдается только при повышенной интенсивности излучения. При малых же интенсивностях ультразвука, наоборот, происходит стимулирование роста бактерий и вирусов. Способность ультразвука уничтожать микроорганизмы и бактерии ученые-медики использовали в своей практике. Так, например, ультразвуком начали стерилизовать препараты сыворотки крови и плазмозаменяющих растворов, что обеспечивает более высокое их качество и длительный срок хранения.

Ультразвук действует и на более сложные живые организмы, такие, как головастики, лягушки, рыбы и пр. При облучении ультразвуком эти организмы парализуются или погибают. Сразу же после начала облучения животные проявляют сильное беспокойство, а через минуту полностью прекращают двигаться. Рыбы при этом

переворачиваются на бок или даже вверх брюшком, а некоторые из них всплывают на поверхность. Если прекратить облучение, рыбы становятся вновь подвижными; если облучение продолжить, то они погибают. При интенсивном облучении на теле рыб возникают небольшие кровотечения. В поле мощной ультразвуковой сирены в течение короткого времени погибают многие мелкие животные и насекомые.

Японской фирмой «Кобе» создан ультразвуковой генератор, работающий на частоте 19,5 килогерца. При воздействии на крыс в течение некоторого времени ультразвуковыми волнами они становятся нервными, пугливыми, а иногда, наоборот, агрессивными и нападают друг на друга. Если ультразвуковой прибор повесить в амбаре или на складе, где водятся крысы, то через некоторое время они либо погибнут, либо будут вынуждены убежать в другое место. Зона эффективного действия прибора 225 квадратных метров.

Всем известно, что дятлы — полезные птицы. Ведь они уничтожают насекомых, питающихся древесной массой, и тем самым сохраняют лес. Однако иногда они наносят и вред, разрушая своими мощными клювами деревянные строения, в стенах которых они разыскивают свое лакомство. Как бороться с птицами в этом случае, не уничтожая их? Японские инженеры и для этой цели применили специальный ультразвуковой генератор. Он работает на частоте 20—50 тысяч герц, отпугивая дятлов в радиусе 50 метров. Подобным методом можно бороться и с термитами, которые превращают деревянные сооружения буквально в труху.

В биологии для исследования физико-химических свойств жидкостей, определения концентрации различных органических и неорганических веществ в растворе, концентрации частиц и микроорганизмов во взвесях и суспензиях, исследования механических свойств биологических тканей используется ультразвуковой резонаторный измеритель РУЗИ. Другой прибор — ультразвуковой низкочастотный диспергатор УЗДН-2Т — тоже применяется в биологии для измельчения микроскопических объектов. Он может быть использован в медицине, химии и минералогии для приготовления суспензии и эмульсий.

А как ультразвуковые колебания воздействуют на человека? Ведь с введением новых технологических про-

цессов, современных машин и оборудования, связанных с применением ультразвуковых колебаний, все большее число людей подвергается воздействию ультразвука. В Московском институте гигиены имени Ф. Эрисмана были произведены многочисленные исследования по изучению влияния ультразвука на состояние рабочих, непосредственно соприкасающихся с ним в своей работе. Ученые установили, что на человека оказывают действие ультразвуковые колебания только большой интенсивности. Те, кто попал в зону сильного ультразвукового излучения, жалуются на недомогание и легкое головокружение, у них появляется тошнота. Если при ультразвуковых колебаниях большой силы держать рот открытым, то в нем ощущается покалывание, в носу появляется неприятное ощущение. Люди, работающие вблизи реактивных самолетов, а также с кузнечными и пневматическими молотками и другими машинами, производящими шум, быстрее утомляются, снижается их слуховая чувствительность. Ученые объясняют это тем, что некоторые механизмы наряду со слышимыми звуками излучают ультразвук.

В Институте охраны труда ВЦСПС разработали меры борьбы с воздействием ультразвука на человека и совместно с Научно-исследовательским институтом технологии машиностроения определили предельно допустимые уровни звуковых давлений, вызываемых ультразвуковыми колебаниями в воздухе. Если все же превышение допустимого уровня шума избежать по условиям технологии невозможно, специалисты института рекомендуют применять индивидуальные средства защиты — заглушки из стекловаты или противошумные наушники, противошумные экраны. Наиболее радикальная мера защиты — это размещать технологические агрегаты ультразвуковых установок в отдельных помещениях, куда рабочие будут заходить по мере надобности лишь на короткое время, используя средства индивидуальной защиты. Значительного ослабления шума можно добиться, если при конструировании ориентироваться на более высокие ультразвуковые частоты. Конструкторы уже разработали установки с рабочей частотой 40—44 килогерца вместо 18—22 килогерц. Многие такие установки уже выпускаются серийно.

При обслуживании ультразвуковых установок необходимо избегать контактного воздействия ультразвуко-

вых колебаний через жидкость, детали или инструменты. При кратковременном контакте с деталями и жидкостью рекомендуется применять две пары перчаток из разнородного материала. Воздушная прослойка между перчатками способствует лучшему отражению и поглощению ультразвуковых волн.

УЛЬТРАЗВУКОВАЯ ДИАГНОСТИКА ЗАБОЛЕВАНИЙ

Благородной цели — охране здоровья человека — подчинены в нашей стране достижения медицинской науки. В борьбе за жизнь человека, его здоровье врачи все чаще обращаются к новым методам диагностики и лечения, основанным на использовании кибернетики, электроники и ультразвука. Каждый новый этап в развитии физики и техники обогащает медицину новыми аппаратами и приборами, позволяющими ввести в практику новые методы диагностики и лечения. А за последние примерно два десятилетия одно из центральных мест в исследованиях для нужд медицины отводится ультразвуку.

Казалось бы, какое отношение имеет ультразвук к медицине? За последние годы выяснилось: самое прямое. У него обнаружились большие и лечебные и диагностические возможности.

Согласно прогнозам специалистов, в ближайшем будущем ультразвук в медицине будет применяться не менее широко, чем рентгеновские лучи. Следовательно, в медицинской диагностике назревает настоящая революция, ибо вряд ли в ней есть такие области, где ультразвук не сыграет свою роль. В настоящее время ультразвук получил широкое применение в кардиологии, хирургии, в акушерстве, гинекологии, нейрохирургии, неврологии, офтальмологии, стоматологии, оториноларингологии и т. д.

Особенно ценно то, что ультразвук располагает огромными диагностическими возможностями, включая диагностику сердечно-сосудистых заболеваний. С помощью ультразвука можно проверить работу сердца и выявить ненормальности функционирования не только самого сердца, но и отдельных его участков. С этой целью при-

меняют узконаправленные ультразвуковые лучи, позволяющие получать ультразвуковую кардиограмму.

Долгое время рентген был единственным и незаменимым средством обнаружения опухолей. Однако рентгеновские лучи выявляют опухоль, когда плотность пораженной ткани отличается от плотности здоровой в полтора-два раза, а это означает, что зачастую уже поздно предпринимать эффективное лечение. После многочисленных опытов ученые предложили для диагностики опухолей использовать ультразвук. Первое время пытались применять теневой метод, но получалась очень высокая контрастность, что не давало возможности отличать одну ткань от другой по физическим свойствам. Поэтому от этого метода отказались. Более приемлемым оказался импульсный метод, основанный, как и в дефектоскопии, на отражении ультразвука от границы раздела двух сред. Этот метод позволяет получить на экране электронно-лучевой трубки прибора видимое изображение, на котором можно отличить ткани, близкие по своим физическим свойствам. Ультразвуковой импульс больной и здоровой тканью отражается по-разному. Отраженные импульсы поступают на экран прибора, где виден своеобразный разрез того или иного участка человеческого тела.

Ультразвуковая эхограмма помогает обнаружить расположение кисты, поставить диагноз целого ряда заболеваний глаза, таких, как катаракта, помутнение роговицы, отслоение сетчатки, кровоизлияния в стекловидное тело, получить рельефные изображения желудочков мозга и других органов. Ультразвуковая диагностика не противопоказана для обследования маленьких детей и тяжелобольных.

В акушерстве среди многих исследований ультразвук занимает ведущее место. Через три недели беременности он фиксирует работу сердца плода и даже определяет двойню. А совсем недавно с помощью ультразвука определили, что у роженицы будет четверо. Об этом рассказала как-то телевизионная передача «Здоровье».

Самый опытный акушер нуждается в диагностическом аппарате, позволяющем своевременно установить причины, осложняющие течение беременности и родов. Такой аппарат появился — это ультразвуковой диагностический аппарат, работающий на принципе эхографии. Ультразвуковые колебания в пределах, необходимых для диагностики, не оказывают никакого отрицательного влияния

на состояние эмбриона и плода в любом периоде его развития, на деятельность половых желез матери. С помощью ультразвука исследуют положение плода, а также состояние костных и мягких тканей.

В лаборатории электроники Института нормальной и патологической физиологии Академии медицинских наук СССР применили ультразвук для исследования кровотока. С помощью ультразвукового прибора экспериментатор может получить сведения о мгновенной величине, линейной, объемной скорости и направлении тока крови. Специальный датчик позволяет делать измерения через стенку сосуда, не нарушая его целости.

В Советском Союзе и за рубежом создан ряд ультразвуковых диагностических приборов, хорошо зарекомендовавших себя в больницах и клиниках.

Ультразвуковой диагностический прибор «Эхоскоп-8» предназначен для обнаружения злокачественных и доброкачественных опухолей, а также различных неоднородностей или инородных тел в тканях человека. Прибор дает возможность изучать топографо-анатомические взаимоотношения органов и тканей, их структуру, плотность и глубину залегания. В комплекте прибора имеется три сканирующих ультразвуковых датчика, обеспечивающих наблюдение на экранах электронно-лучевых трубок одномерного и двухмерного изображений сечения исследуемого органа или участка тела. Одномерное и двухмерное изображения воспроизводятся двумя независимыми электронно-лучевыми трубками. Третья трубка и фотоаппарат обеспечивают возможность полуавтоматического фотографирования наблюдаемых изображений. На снимках отпечатываются номер кадра и шифр пациента. Размер изображения в зависимости от глубины расположения наблюдаемого органа может быть выбран 0—120 или 0—240 миллиметров. Отсчет глубины залегания различных неоднородностей производится непосредственно по шкалам индикаторов.

Всесоюзным научно-исследовательским институтом медицинского приборостроения создан ультразвуковой эхоэнцефалограф «Эхо-11» для обнаружения опухолей мозга и других образований, определения патологических состояний мозга. Аппарат может определять положение плода. Диагностическая процедура проста, не требует специальной подготовки больного, безопасна и почти не имеет противопоказаний. Эхоэнцефалография

незаменима в тех случаях, когда быстрота или тяжесть болезни резко ограничивает или исключает возможность применения других диагностических методов. В аппарате предусмотрена регистрация эхограмм на фотопленку.

В клинике госпитальной терапии Воронежского медицинского института разработали ультразвуковой метод исследования сердца. Ультразвуковой локатор позволяет получить представление о движении каждого сердечного клапана в отдельности, установить время, в течение которого движутся, смыкаясь и размыкаясь, клапаны сердца. Ультразвуковые сигналы записываются одновременно с электрокардиограммой, а поэтому их можно сопоставлять. Ультразвуковой локатор сердечных клапанов можно применять в диагностике пороков сердца. В клинике подготовлена специальная топографическая карта грудной клетки. На ней отмечены точки, указывающие, куда следует прикладывать щуп локатора, чтобы записать движения определенного участка сердца.

Ультразвуковой диагностический прибор «Фазокард» предназначен для специальных исследований сердца. Он может определить степень митрального стеноза и обнаружить тромб в левом предсердии. Ультразвуковой датчик, накладываемый на левую сторону груди в области второго и третьего межреберья, является одновременно передатчиком и приемником. Отраженные от сердца ультразвуковые импульсы преобразуются в электрический ток, напряжение которого пропорционально величине перемещения стенки сердца. Так получается ультразвуковая кардиограмма (УКГ). Регистрирующее устройство, выдающее УКГ,— многоканальное, к нему можно подключить «выход» электрокардиографа и вести, таким образом, запись еще и электрокардиограммы (ЭКГ). Совместный анализ УКГ и ЭКГ дает возможность поставить диагноз некоторых видов сердечных заболеваний, который невозможно сделать другими методами диагностики. Установленная в приборе электронно-лучевая трубка совместно с системой регулировки глубины просматривания позволяет врачу выбрать интересующий участок сердца для записи УКГ. На электронно-лучевой трубке можно наблюдать форму УКГ.

Для исследования сердца служит ультразвуковой прибор «Экран», разработанный Всесоюзным научно-исследовательским институтом токов высокой частоты имени профессора В. П. Вологдина. Внешне прибор напоми-

нает телевизор. Врач укрепляет на груди пациента миниатюрный датчик, включает прибор, и на экране возникает изображение бьющегося сердца. Причем в отличие от рентгеновского снимка отчетливо различимы самые тонкие детали внутренней структуры органа. В реальном масштабе врач может проследить за работой отдельных клапанов и мышц. Прибор «Ритм» этого же института контролирует ритмичность работы сердца. Фокусированная акустическая система аппарата дает точную картину ритмики его отделов и элементов, неся информацию именно из тех областей, которые в данный момент интересуют врача.

Советскими специалистами разработана и целая серия ультразвуковых диагностических аппаратов: эхоскопы «Обзор-10» и «Эхо-31», портативный прибор «Малыш» для определения сердцебиения еще неродившегося ребенка, ультразвуковой локатор сердца УДЛ-1, эхотахокардиометр ЭТК-1, тоже для исследования сердца, и другие. В будущем по мере развития ультразвуковой голографии удастся получать видимые объемные изображения внутренних органов и тканей.

В последнее время ультразвуковой метод диагностики сердечных заболеваний завоевывает все большее признание кардиологов. Им воспользовались даже в космосе. В июне 1982 года на борту научно-исследовательского комплекса «Салют-7» — «Союз Т-5» — «Союз Т-6» советские космонавты А. Березовой, В. Лебедев, В. Джанибеков, А. Иванченков и французский космонавт Жан-Лу Кретьен применили ультразвуковой эхо-метод обследования сердца и других органов на специальной ультразвуковой диагностической аппаратуре. В феврале 1984 года на космическом корабле «Союз Т-10» в составе экипажа командира корабля Л. Кизима, борт-инженера В. Соловьева и космонавта-исследователя О. Атькова тоже проводились такие исследования, но еще в большем объеме с учетом того, что кандидат медицинских наук О. Атьков на земле специализировался как раз в области ультразвуковых методов диагностики сердечных заболеваний.

Для проведения комплексных кардиологических исследований и диагностики сердечно-сосудистых заболеваний созданы новые отечественные ультразвуковые приборы.

Ультразвуковой эхотахокардиограф УЗКАР предназначен для диагностики заболеваний сердца человека. УЗКАР основан на изучении характера движения клапанов, межжелудочковой перегородки, измерения размеров полостей сердца, митральных сосудов. Другой ультразвуковой эхотахокардиограф ЭТК-03-В, предназначенный для исследования сердечно-сосудистой системы человека методом доплеровской эхолокации, позволяет получать данные о скорости движения крови и кардиоэлементов.

Ультразвуковой эхокардиоскоп М-ЭКС-01 предназначен для исследования сердечно-сосудистой системы человека путем наблюдения и регистрации ультразвуковой кардиограммы (УКГ). Прибор работает как в автономном режиме, так и совместно с выпускаемым серийно мультисканирующим визуализатором «Экран-1» в режиме выбора заданной строки изображения на нем. Другой ультразвуковой эхокардиоскоп ЭКЧ-2СМ-03 («Сектор ТМ-1») используется для визуального наблюдения структур сердца при секторном механическом сканировании, получения эхограмм по биссектрисе угла сканирования. Еще один ультразвуковой эхокардиоскоп, ЭКС-1Л-05 («Экран-2»), служит для исследования сердечно-сосудистой системы и других органов человека. Прибор обеспечивает возможность наблюдения и оперативного планиметрирования В-эхограмм сечений исследуемых структур. Эхозонд состоит из 64-элементной антенны и электронной схемы, выполненной на основе гибридной технологии.

Ультразвуковые медицинские диагностические приборы, аппараты и установки созданы многими фирмами зарубежных стран.

Ультразвуковой диагностический прибор австрийской фирмы «Кретстехник» обнаруживает изменения и инородные тела в ткани. Он также позволяет устанавливать диагноз опухолей мозга и наблюдать за работой сердца. Прибор крепится на мягко передвигаемом транспортном столике, на котором установлены фотоаппарат и диктофон. Прибором, диктофоном и фотоаппаратом управляют дистанционно с помощью специальной приставки, имеющей четыре ножных привода. Другой ультразвуковой диагностический прибор этой же фирмы предназначен для исследования глаза. С его помощью можно определять и оценивать изменения в глазном яблоке и

орбите. Исследования ведутся на разных частотах. Прибор тоже имеет фотоаппарат и диктофон.

Японский ультразвуковой диагностический прибор измеряет величину смещения мозговой камеры, вызываемого внутренним кровотечением или кровоизлиянием в мозг. С помощью двух ультразвуковых зондов излучают ультразвуковые колебания с обеих сторон головы в мозг, в результате чего на верхней части экрана электронно-лучевой трубки с правой стороны головы появляется отражательное изображение от третьей мозговой камеры, на нижней части экрана — отражательное изображение с левой стороны головы. Третья мозговая камера у здорового человека расположена в середине мозга, в связи с чем верхние и нижние отражательные изображения на экране электронно-лучевой трубки совпадают. А у нездорового человека верхнее и нижнее изображения смещены одно относительно другого. Там же, в Японии, создан аппарат, который позволяет очень рано обнаружить сердцебиение эмбриона. Принцип действия его основан на использовании эффекта Доплера, наблюдаемого при распространении ультразвуковых волн в режиме непрерывных колебаний внутри живого организма. Волны отражаются от подвижных органов, в результате чего частота отраженного сигнала изменяется в зависимости от его скорости и направления отражающей поверхности исследуемого органа.

Западногерманская фирма «Сименс» разработала ультразвуковую установку для исследования кровообращения в венах и артериях. Врач подносит к руке пациента приемопередающее устройство сигарообразной формы и ведет его вдоль сосуда, слегка касаясь кожи. Ультразвуковые волны проникают сквозь стенки сосудов и, встречая на своем пути кровяные тельца, отражаются от них. Отраженные волны поступают в приемное устройство. Если, предположим, внезапно меняется скорость движения кровяных телец, что обычно свидетельствует о сужении сосудов, образовании тромба или слабости венозного клапана, то изменяется тон слышимого звука, который издает прибор при исследовании. Это признак неблагополучия на данном участке кровеносного сосуда.

Исследования, проведенные в Институте сердечно-сосудистой хирургии имени А. Н. Бакулева, показали, что ультразвуковая доплерография может оказать существенную помощь в предупреждении инсульта. Разрабо-

танный в институте метод основан на отражении ультразвуковых волн от движущегося объекта. В данном случае такими объектами являются частицы крови, поступающей в мозг.

Арсенал диагностических средств в офтальмологии пополнился ультразвуковым прибором для исследования глаза, в частности для обнаружения таких заболеваний, как отслойка сетчатки, кровоизлияния, новообразования в глазном яблоке и за его пределами. Прибор может точно указать положение инородного тела, что значительно облегчает хирургическую операцию. Кроме того, этот метод позволяет производить измерения внутриглазных расстояний и вести наблюдения при различных патологических процессах.

В нейрохирургии ультразвуком измеряют перемещения средних структур мозга, наблюдаемых при опухолях мозговых полушарий, кровоизлияниях и т. п. В акушерстве и гинекологии ультразвуковое изображение брюшной полости дает возможность обнаружить миому матки, опухоли яичников, брюшную водянку, а также исследовать плод в разных стадиях развития. Ультразвуковой детектор пульса наблюдает за сердечной деятельностью в ранних стадиях жизни плода, а также контролирует пульс плода непосредственно перед родами.

Ученые ведут работы по применению ультразвука для исследования кровотока в сосудах кровеносной системы. Этим методом можно получить сведения о количестве крови, протекающей по крупным сосудам, о скорости кровотока в данный момент, а также о распределении скоростей по всему сечению артерии.

Новый ультразвуковой эхокардиограф SSD-119B фирмы «Aloka» (ФРГ) представляет собой прибор с секторным сканированием и наблюдением эхокардиограмм в реальном масштабе времени. Прибор позволяет получить широкую поперечную эхокардиограмму сердца с высоким качеством изображения. Компактная механическая секторная сканирующая головка специально разработана для этого прибора. Небольшая и демпфирующая контактная поверхность обеспечивает хороший контакт с кожей пациента и облегчает применение прибора в случае узкого межреберного сканирования. Новая сканирующая головка может быть использована и для получения эхокардиограмм. Сигнал электрокардиограммы выводится на экран вместе с эхокардиограммой в реаль-

ном масштабе времени. Наблюдение и фотографирование может синхронизироваться с сигналом электрокардиограммы.

С прибором по отдельному заказу может поставляться запоминающее устройство, позволяющее наблюдать неподвижное секторное изображение. Фиксирование (замораживание) изображения может осуществляться в момент при синхронизации с сигналом электрокардиограммы.

Компьютеризованная тридцатиканальная ультразвуковая система с доплеровским входом предназначена для неинвазионного (то есть без вторжения в саму кровеносную систему) измерения кровотока. Использование доплеровского метода совместно с компьютерной обработкой получаемой информации делает прибор наиболее передовой и даже в некотором роде уникальной системой среди таковых, имеющихся на мировом рынке. Прибор позволяет получать качественные и количественные данные о кровотоке и периферической сосудистой системе и представлять эти данные на интегральном видеодисплее вместе с другими физиологическими параметрами, расчет которых ранее был невозможен. Исследование больного выполняется за более короткое время и без использования инвазионного и травматизирующего оборудования.

Система MAVIS-C дает трехмерную информацию о внутреннем просвете кровеносных сосудов и рассчитывает общий кровоток по отдельно взятому сосуду, а также определяет профиль линейных скоростей на выбранном отрезке сосуда. Данные, окончательно выводимые на видеодисплей монитора, включают в себя сведения о больном, дату и область исследования, профиль пиковых скоростей, кривую изменения средних моментальных скоростей в течение всего сердечного цикла, расчетную величину средней линейной и объемной скоростей кровотока (расчет последней величины осуществляется через усреднение пространственных и временных параметров), пиковую систолическую величину просвета сосуда и глубину его залегания.

Ультразвуковой прибор LABO 2008D фирмы «Лабомед» (ФРГ) определяет стенозирующие процессы в сосудах головы и конечностей на использовании эффекта Доплера. Для этой же цели имеется другой прибор Doppler-762 фирмы «Кранцбюхлер» (ФРГ). Этой же фирмой создан ручной ультразвуковой миниатюрный аппарат

Wasculjr Dopler для определения кровотока в мелких сосудах кожи. Для определения кровотока предназначен ультразвуковой доплеограф MIDATA (Франция). Для определения состояния клеток головного мозга используется переносной эхоэнцефалограф Nihonkoden (фирмы Pikerinfernacional).

УЛЬТРАЗВУКОВОЕ ЛЕЧЕНИЕ ЗАБОЛЕВАНИЙ

Вторая важная область применения ультразвука в медицине — лечение. Лечебное действие ультразвука складывается из трех факторов: теплового, механического и физико-химического.

Тепловое действие основано на глубоком и равномерном прогревании тканей в результате поглощения ею энергии ультразвукового излучения. Механическое действие представляет собой своего рода микромассаж клеток и тканей. При этом смещение частиц невелико, скорость их движения также небольшая. Физико-химическое действие заключается в изменении хода окислительно-восстановительных процессов, ускоренном расщеплении сложных белковых комплексов до обычных органических молекул, активизации ферментов. Благотворное воздействие ультразвука на обмен веществ объясняется, по-видимому, тем же.

Ультразвуковая физиотерапия оказывает обезболивающее, противовоспалительное и тонизирующее действие. Ультразвуковой микромассаж снимает боль, стимулирует деятельность нервной и эндокринной систем, улучшает функциональное состояние соединительной ткани и усиливает защитные реакции организма. Замечено значительное улучшение функции суставов и мышц. Лечение ультразвуком в некоторых случаях способствует понижению кровяного давления у людей, страдающих гипертонической болезнью. Ультразвук стал надежным помощником врача в лечении многих болезней, в частности артрозов, артритов, невралгий, невритов, радикулитов.

В последнее время широкое распространение получил ультрафонофорез — одновременное воздействие на организм ультразвуком и лекарственными препаратами. На определенный участок тела наносят лекарственное веще-

ство, а затем, как говорят специалисты, «озвучивают» это место. Ультразвуковые колебания увеличивают проницаемость кожи для частиц лекарственного вещества: они легко проникают в организм и накапливаются, образуя «кожное депо». Потом постепенно лекарство из депо поступает в кровь и лимфу, доставляется к органам и тканям. Лекарства, вводимые таким способом, дольше задерживаются в организме, оказывая свое терапевтическое действие. Помимо того что ультразвук облегчает лекарству путь в организм, он еще как бы массирует клетки и другие тканевые элементы. Под влиянием этого своеобразного микромассажа повышается активность ферментов, активизируются процессы внутриклеточного обмена веществ, улучшается лимфо- и кровообращение.

Ультразвук находит все большее применение в физиотерапии, но пользоваться им нужно умело. Очень важно правильно выбрать дозировку, режим работы ультразвуковых приборов и частоту. Доза, как правило, определяется по продолжительности воздействия ультразвука средней интенсивности. Частоту ультразвуковых колебаний выбирают с таким расчетом, чтобы поглощение было минимальным. Это позволяет лучше воздействовать на внутренние органы.

Всесоюзным научно-исследовательским институтом медицинского машиностроения создано несколько моделей ультразвуковых физиотерапевтических аппаратов. Некоторые из них уже применяются в больницах и клиниках. Одна из наиболее распространенных моделей — ультразвуковой физиотерапевтический портативный аппарат «Ультразвук Т5», используемый в комплексе с другими средствами для лечения невралгии, ишиаса, радикулита, миалгии, артритов, экзем, фурункулеза, трофической язвы, заболеваний глаз, болезни Бехтерева и др.

Аппарат «Ультразвук Т5» снабжен десятиступенчатым клавишным регулятором мощности, что позволяет непосредственно без дополнительных измерений устанавливать необходимую дозу ультразвука для каждого больного. Возможность работы как в непрерывном, так и в импульсном режиме позволяет выбрать в зависимости от индивидуальности пациента и характера заболевания наиболее эффективную процедуру. Процедурные часы, встроенные в аппарат, автоматически выключают его по истечении заданного времени и выдают звуковой сигнал об окончании процедуры. К аппарату прилагается изме-

ритель мощности ультразвука для проверки калибровки регулятора мощности.

В ультразвуковой физиотерапии применяют специальные медицинские ультразвуковые головки. Существуют два метода облучения: прямой и иммерсионный. В первом случае ультразвуковую головку устанавливают на поверхности тела, смазанной тонким слоем масла или специальной контактной смазкой. Во втором случае облучение производят в водяной ванне, где контактной средой служит вода.

Ультразвуковой настольный физиотерапевтический аппарат TUR US 6-1 (ФРГ) по применению и назначению аналогичен отечественному аппарату «Ультразвук Т5». Он может работать в двух режимах: непрерывном и импульсном.

За последние годы создан ряд новых отечественных медицинских ультразвуковых приборов и аппаратов. Среди них физиотерапевтический аппарат УЗТ-101 для лечения периферической нервной системы, опорно-двигательного аппарата и других заболеваний; физиотерапевтический аппарат УЗТ-102 для лечения стоматологических заболеваний (пародонтоза, глоссалгии, ортрозоартритов, височно-нижнечелюстных суставов, келлоидных и послеоперационных рубцов лица и шеи и т. д.); аппарат «Лор-3» для лечения хронических тонзиллитов, гайморитов и ринитов; аппарат «Стержень-1» для лечения урологических и проктологических заболеваний (простатитов, циститов и т. п.); аппарат УЗТ-31 для использования в гинекологии и акушерстве; комплекс «Байкал» для разрушения камней при мочекаменной болезни; прибор «Узум» для разрезания, расслаивания тканей при хирургических операциях и остановки кровотечения; семейство аппаратов «Гамма» для терапевтического лечения.

В Акустическом институте АН СССР создана установка, фокусирующая ультразвук, подобно увеличительному стеклу. Сфокусированные ультразвуковые колебания используются в нейрохирургии. Ультразвуковым фокусирующим прибором можно разрушать отдельные участки нервных клеток, не повреждая другие. Прибор создает в определенной области или точке очень большое звуковое давление. Фокусное расстояние можно изменять, а следовательно, и выбирать любой оперируемый участок по глубине залегания без повреждения верхних слоев.

Ультразвук стал завоевывать признание и в обычной хирургии. В своде законов царя Хаммурапи перечислены различные хирургические операции, при которых ткани больного рассекались бронзовым ножом. Во времена Гиппократа в Греции уже начали применять хирургические ножи с впаянным стальным лезвием. С тех времен хирургический инструмент непрерывно совершенствовался, но за последние сто—двести лет он изменился мало. В основном все те же стальной нож и нитки. Теперь хирурги получили такие наисовременнейшие «скальпели», как лазерный и ультразвуковые лучи.

Ультразвуковой «скальпель» режет ткань на границах контакта клеточных мембран за счет высокочастотной энергии.

С помощью ультразвукового инструмента можно и рассекать и соединять почти все живые ткани. Так, ультразвук уже применяется при трепанациях черепа и других костей. Проводятся опыты по ультразвуковой сварке внутренних органов в местах повреждении сердца, легких, печени, селезенки, мочевого пузыря. Не исключено, что появится технология ультразвукового сшивания кровеносных сосудов и нервов, пищеварительных и эндокринных желез. Ультразвуковой хирургический инструмент имеет, кроме всего прочего, одно ценное качество — он делает хирургическое вмешательство менее болезненным, потому что ультразвуковые колебания сами по себе воздействуют как обезболивающее средство.

Чтобы исправить различные врожденные и приобретенные деформации костей, специалистам нередко приходится прибегать к остеотомии — операции по рассечению кости. Ныне все чаще в таких случаях хирург берет в руки не долото и пилу — традиционные инструменты, а ультразвуковой волновод. Ультразвук режет кость так же легко, как горячий нож масло. И что очень важно, применение его полностью исключает образование костных сколов, мелких отломков. Разрез, произведенный ультразвуком, получается ровным и гладким.

Ультразвук помогает не только легко и быстро разрезать кость, но и вновь соединять ее. На опиленные поверхности наносится специальный клей циакрин и костная щебенка. Затем костные отломки соединяют, и под действием ультразвука специфический «припой» отвердевает, удерживая отломки кости в нужном положении. Прочный и надежный сварной шов постепенно рас-

сасывается, заменяясь живой костной тканью. Ультразвук применяют и тогда, когда послойной наплавкой надо заполнить дефект в костях, сварить отломки кости при многооскольчатых переломах или «наварить» новую суставную головку.

Для определения плотности сросшейся после сварки кости применяется ультразвуковой прибор «Остеометр», работающий, как и все измерительные ультразвуковые приборы, на принципе сопоставления скорости распространения ультразвука в различных по физическим характеристикам средах. «Остеометр» достаточно точно и качественно определяет плотность сросшейся кости. Группа ученых-медиков и инженеров за внедрение ультразвука в хирургию удостоена Государственной премии.

Есть такое заболевание — пароксизмальная тахикардия, проще говоря, учащенное, приступообразное сердцебиение. Здоровое сердце получает сигналы, управляющие его работой, строго фиксированными точками и по строго фиксированным проводящим путям. В больном сердце эта строгость нарушается, образуются дополнительные проводящие пути, которые и вносят разнобой в нормальную работу сердца, сбивая его с ритма. В печати сообщалось об успешных попытках с помощью ультразвука как бы подавить, ликвидировать эти дополнительные проводящие пути. Операции, судя по тем же сообщениям, проводились на открытом сердце и давали хороший, стойкий эффект.

Для ультразвуковой резки и сварки биологических тканей создан аппарат УРСК-7Н. Он обещает стать в целом ряде случаев незаменимым инструментом в травматологии, ортопедии и общей хирургии, поскольку может обеспечить щадящие и биологически приемлемые методы хирургического воздействия на ткани организма. Прибор позволяет рассекать кость практически в любом направлении, быстро и прочно соединять костные фрагменты, «приваривать» трансплантат и воссоздать костную ткань для заполнения дефектов в костях, удалять опухоли и иссекать рубцы при различных пластических операциях.

Для этих же целей служит ультразвуковая установка УЗУМ-1. Она состоит из ультразвукового генератора, большого набора скальпелей и стерилизаторной ванны. Установка представляет собой своеобразный хирургический комбайн, получивший уже широкое признание в кли-

никах. Она обеспечивает два вида операций — на мягких тканях и сварку костей. У ультразвукового «скальпеля» много достоинств: он позволяет резко сократить кровопотери, вероятность осложнений. Раны получаются ровные, не рваные, а значит, их края очень хорошо заживают. После операции почти не видно рубцов.

В зубоврачебной практике тоже применили ультразвук. Им обрабатывают полости зубов и удаляют зубной камень. Ультразвуковая обработка зуба совершенно безболезненна, не вызывает неприятных ощущений и нагрева. Однако у ультразвуковой бормашины есть недостаток — врач не может по реакции больного определить момент подхода инструмента к нерву. Поэтому ультразвуковые бормашины применяются пока в отдельных случаях только опытными специалистами. И наоборот, ультразвуковой аппарат для снятия зубного камня показал хорошие результаты и успешно применяется на практике. Он позволяет безболезненно, бескровно, быстро удалять зубной камень и налет с зубов. Слизистая рта не травмируется, «карманы» полости обеззараживаются, а пациент вместо боли ощущает приятную теплоту. Аппарат портативен, легок, прост в эксплуатации и не требует от врача физических усилий, как при обычном снятии зубного камня. Аппарат снабжен набором вставок с рабочими наконечниками различной формы, обеспечивающими доступ к любым участкам полости рта. Хорошие результаты получены при использовании ультразвука для сварки и пломбировки зубов. При любых современных методах лечения зубов между пломбировочным материалом и обработанными стенками зубных полостей остается щель, и хотя она очень мала, часто становится причиной возобновления кариесного процесса, расшатывания и выпадения пломбы. Ультразвуковая пломбировка исключает этот недостаток и открывает широкие перспективы в стоматологии.

Для лечения таких заболеваний, как туберкулез, бронхиальная астма, катар верхних дыхательных путей, а также для профилактики некоторых заболеваний применяют аэрозоли различных лекарственных веществ, то есть веществ в распыленном виде. Такой вид физиотерапии называется ингаляцией. Здесь ультразвук участвует в лечении косвенно. С его помощью распыляют лекарственные вещества, особенно такие, как антибиотики, которые затем вдыхают больные. Ультразвуковой инга-

лятор очень прост. На поверхности каждого лекарственного вещества с помощью ультразвукового излучателя создается фонтан очень мелких капель. Обычно в этом случае применяют сферический излучатель, фокальная точка которого совмещается с поверхностью распыляемой жидкости. Ультразвуковые ингаляторы удобны тем, что их можно применять при коллективном лечении. Для этого аэрозоли создают ингалятором в специальном помещении, где находятся больные, вдыхающие распыленное лекарство.

В ФРГ создан ультразвуковой аэрозольный аппарат TUP USI-50 — индивидуальный ингалятор, предназначенный для диагностики, профилактики и последующего наблюдения за больным при заболевании дыхательных путей. Аппарат можно применять как для использования аэрозольного средства малыми дозами, так и для употребления аэрозоля продолжительное время. Наряду с известным холодным аэрозолем аппарат может производить также аэрозоль с температурой примерно 33 градуса. Необходимую дозировку можно изменять регулятором интенсивности. Электронная следящая система обеспечивает равномерное распыление и точную индикацию распыленного количества медикаментов на весь диапазон запаса медикаментов.

Главная функция крови в организме — перенос кислорода от легких к тканям, а обратно — углекислоты. Эту функцию крови помогает выполнять содержащийся в эритроцитах гемоглобин, способный легко присоединять и отдавать оба эти вещества. Оказывается, такой способностью обладают и некоторые соединения, например фторуглеводы. Недавно проведенные эксперименты дают основание предполагать, что фторуглеводы могут в какой-то степени заменить кровь. Животные, у которых вся кровь была заменена эмульсией фторуглеводов в кровяной плазме, прожили 8 часов. Трудности возникли в приготовлении эмульсии, частицы которой были бы достаточно малы и могли бы проникать в самые тонкие капилляры кровеносной системы. Проблема была решена с помощью ультразвуковой обработки под высоким давлением, в результате чего была получена эмульсия с частицами размером менее одной тысячной миллиметра. Не исключено, что такая эмульсия найдет практическое применение при переливании крови, пересадке и консервации органов.

Ультразвук незаменим в фармацевтической промышленности в процессах приготовления различных медицинских препаратов. Если раньше для получения настоек валерианы и полыни требовалось семь суток, то теперь благодаря ультразвуку эта операция выполняется всего за полтора часа. Значительно ускоряется приготовление настоек йода и других препаратов, сокращается расход сырья. С помощью ультразвука удается увеличить выход активных начал из различных лекарственных растений, таких, как мак, ландыш, красавка, спорынья и др. Ультразвук позволяет получить тонкую взвесь камфорного масла в воде, что раньше вообще было невозможно. Под воздействием ультразвуковых колебаний возникают новые эффекты — повышается чувствительность живой клетки к воздействию химических веществ. Это открывает пути к созданию новых, более безвредных вакцин, ибо при их изготовлении можно будет использовать химические реактивы значительно меньшей концентрации. Ультразвук становится хорошим помощником микробиологов и фармакологов при создании новых лекарственных препаратов.

Как уже упоминалось, слуховой аппарат человека не воспринимает ультразвуковых колебаний, но они воздействуют на ткани живого организма. Этим и воспользовались ученые Государственного научно-исследовательского института уха, горла и носа Министерства здравоохранения РСФСР. Они решили подвести ультразвуковые колебания к воспринимающим элементам внутреннего уха через окружающие их плотные среды. Оказалось, что дело не в отсутствии восприятия ультразвука, а в невозможности передать соответствующие колебания через воздух.

Понятно, какой большой теоретический и практический интерес вызывают исследования скрытых возможностей расширения диапазона частот, воспринимаемых человеком. Уже получены интересные результаты. Слуховое восприятие ультразвуков возможно даже в тех случаях, когда средние и высокие частоты слышимого диапазона не воспринимаются. Установлено, что при многих заболеваниях органов слуха человека внутренние звуковоспринимающие устройства не повреждаются. Поэтому, если провести ультразвуковые колебания непосредственно через кости и ткани, возникает слуховое ощущение. Если же воспринимающий аппарат поражен,

то как слышимые звуки, так и ультразвуки не будут восприниматься. Таким образом, по показателю слухового восприятия ультразвука можно установить характер заболевания, лежащего в основе слуховых расстройств. Диагноз можно поставить даже в том случае, когда использование обычных слышимых раздражителей не дает представления о сущности заболевания. Эти исследования имеют прямое отношение к задаче, которой давно занимаются ученые и специалисты, пытающиеся облегчить положение слепых.

Человеческий визуальный аппарат, попросту говоря, зрение — самая сложная часть нервной системы, которая состоит примерно из миллиона волокон, соединяющих глаз с мозгом. Возможности науки еще весьма далеки от сколько-нибудь адекватного воспроизведения подобной системы, но тем не менее ученые усиленно ищут пути разрешения этой проблемы. Известно, что слепые обладают тонко развитым слухом и ощущают предметы на расстоянии благодаря звуковому эху, отраженному этими предметами. Эхо обычно настолько слабое, что сами люди его не воспринимают и не могут объяснить, как они ощущают предметы. Для определения способности человека к восприятию ультразвуковых волн были проведены интересные опыты. При этом принимались все меры к тому, чтобы стены, пол и потолок не отражали звуков, а полностью поглощали их. В специальной маске, надежно закрывающей глаза, проверяемый сидел в кресле и ничего не видел. Но достаточно было включить расположенный сзади него ультразвуковой генератор, как он начинал «видеть» силуэты предметов, отражающих ультразвуковые волны. На расстоянии трех метров он различал руку с растопыренными пальцами или сжатую в кулак, а также предметы разной формы.

Новозеландский ученый Л. Кэй разработал прибор, посылающий узкие пучки ультразвуковых волн, подобно тому, как это делает летучая мышь. Отраженное эхо накладывается на излученные импульсы, в результате чего возникают «биения» звука, воспринимаемые человеком через наушники. Тот, кто пользуется этим прибором, должен уметь различать эхо от различных предметов, а также замечать характерные особенности отраженных сигналов от нескольких предметов одновременно. Этот прибор сложный и требует долгой практики для эффективного использования. Проще и перспективнее другой

прибор — ультразвуковые очки, изобретенные также профессором Л. Кэем. В переднюю часть очков вмонтирован ультразвуковой преобразователь, который излучает широкий пучок волн. Приемники — микрофоны, находящиеся по обеим сторонам головы,— улавливают отраженное эхо. По степени громкости, высоте звука и времени звучания сигналов, воспринимаемых каждым ухом, можно установить местонахождение предмета, от которого отразились ультразвуковые волны, и его размеры.

В Советском Союзе создан ультразвуковой прибор «Ориентир», предназначенный для слепых. Прибор представляет собой портативное приемопередающее устройство с блоком питания и миниатюрными телефонами. «Ориентир» собран на полупроводниках. Масса его 280 граммов. Восемь сухих батареек типа «Кристалл» обеспечивают непрерывную работу прибора в течение 24 часов. Он позволяет обнаруживать предметы на расстоянии до 10 метров.

Человек в черных очках вышел на улицу. В руке у него небольшой предмет, напоминающий карманный фонарик. Это передатчик ультразвуковых колебаний. Слепому теперь не нужна традиционная палочка, которой он постукивал, медленно двигаясь по тротуару. Щелкнул выключатель, и в ушах, куда вставлены микронаушники, возникло приятное мелодичное жужжание. Но вдруг тон звука изменился. Это результат того, что ультразвуковые волны, излучаемые передатчиком, встретили на своем пути препятствие, отразились от него и приняты приемным устройством. Но что это: стена, столб или человек? Можно ли определить по звуку характер предмета? Человек, впервые взявший этот прибор, не сможет им пользоваться — нужна предварительная тренировка. На занятиях, направляя прибор на различные предметы, слепой запоминает характерные особенности отраженных от них звуков и постепенно привыкает их различать. По высоте тона он судит о расстоянии до обнаруженного предмета, а по тембру звука — о характере предмета; изменение тона сигнала указывает на то, что предмет движется — удаляется или приближается (доплеровский эффект). Дети обучаются значительно быстрее взрослых. Если слепой постоянно пользуется прибором, он, можно сказать, обучается видеть звуковую картину окружающего мира, то есть у него формируются определенные

представления об окружающих его предметах как об объектах характерного звучания.

В Эдинбургском университете (Великобритания) тоже создан ультразвуковой прибор для слепых. Через конус, укрепленный на лбу человека, прибор посылает ультразвуковые импульсы. Отраженное различными предметами эхо этих импульсов слышно в наушниках. Чем ближе предмет, отражающий импульсы, тем ниже тембр звучания, чем больше предмет, тем громче звук. Сигналы в наушниках не мешают слепому слышать и другие звуки.

Впервые в мировой практике глазные болезни стали лечить ультразвуком в Одесском институте глазных болезней и тканевой терапии имени В. П. Филатова. Этот метод оказался эффективным, когда обычные методы лечения — физиотерапия, витаминная и тканевая терапия — не давали положительных результатов. Одесскому институту принадлежит приоритет в разработке методов лечения многих заболеваний глаз: осложнений при пересадке роговой оболочки, осложнений после удаления катаракты. В институте впервые начали лечить травматические катаракты, атрофию зрительных нервов и одно из самых тяжелых заболеваний глаза — дегенеративное перерождение сетчатки, а также ее отслоения.

Непременное условие нормального зрения — хороший контакт сетчатки с сосудистой оболочкой глаза. При нарушении контакта возникает опасное заболевание — отслойка сетчатки. Врач может заметить это с помощью специального зеркала. Однако если прозрачная часть глазного яблока помутнела, визуальный осмотр не дает результатов. В этом случае на помощь приходит ультразвуковой прибор «Эхо-21» для обнаружения отслойки сетчатки и инородных тел в глазу. С помощью специальных зондов (датчиков), прикладываемых к поверхности глаза, импульсы ультразвуковых колебаний направляются в глубину глазного яблока. Встречая на своем пути среды с различными плотностями, ультразвуковые волны отражаются от границ раздела и воспроизводятся на экране электронно-лучевой трубки в виде эхограммы. По форме и размерам ее импульсов врач судит о степени заболевания и наличии в глазу инородных тел, сгустков крови, опухолей.

Новый метод удаления катаракты разработали американские ученые. Его суть в том, что врач, наблюдая в микроскоп за движением своей руки, вводит ультра-

звуковой щуп в полость, отделяющую роговицу от хрусталика. Щуп изготовлен из титанового сплава в виде пустотелой иглы диаметром один миллиметр, помещенной в специальный силиконовый чехол, соединенный с ультразвуковым генератором. Когда игла входит в соприкосновение с хрусталиком, он под действием ультразвука частотой 40 тысяч колебаний разжижается и начинает разрушаться. В результате образуется жидкость, которая смешивается с дезинфицирующим раствором, поступающим через кольцевой зазор между полой иглой и силиконовой оболочкой, и отсасывается через внутреннюю полость иглы. Новый метод более прост, а главное, у больного намного сокращается послеоперационный период. Если раньше пациент должен был провести минимум неделю на больничной койке, а затем месяц дома, то теперь он уже через несколько дней может приступить к работе. По мнению американских специалистов, такой метод ультразвуковой хирургии может быть использован при удалении желчных камней, опухолей и атеросклеротических отложений в сосудах. Американской фирмой COOPERVISION создана серия приборов, в том числе и ультразвуковых, для лечения глазных заболеваний: «Кавитро-Кельман-800», «Фрагматон-8300», «Ультраскан» — модель 404.

Врачи центральной больницы в Токио с помощью ультразвука пытаются лечить близорукость, столь распространенную среди японцев. Глазное яблоко облучают ультразвуковыми колебаниями. Образующееся тепло вызывает усиленное кровообращение и активизирует обмен веществ в сетчатке. Видимо, ультразвуковые волны также содействуют расслаблению фокусирующих мышц хрусталика. Воздействие ультразвука благоприятно сказывается и на нервных окончаниях, и на глазном яблоке.

Австрийскими медиками выдвинута смелая идея использовать ультразвук для лечения атеросклероза. Предполагается, что тут сыграет свою положительную роль явление кавитации. Насколько эта идея плодотворна, эффективна, да и осуществима ли вообще — покажет будущее.

Хирургические операции связаны, как правило, с бо́льшей или меньшей потерей крови пациентом. Особенно опасны бывают послеоперационные кровотечения. Их стараются предупредить с помощью препаратов, повышающих свертываемость крови, для остановки начавше-

гося кровотечения применяют разного рода средства и приспособления. А нельзя ли с той же целью использовать ультразвук? Оказалось, можно. Это доказали английские врачи серией экспериментов над животными (кроликами). Эксперименты же дали повод предположить, что ультразвуковое облучение прооперированной поверхности способствует более быстрому заживлению раны, то есть росту новых клеток и ускорению протекающих в них реакций синтеза.

В США была предпринята попытка с помощью ультразвука устранить болевое ощущение после ампутации конечностей. У одного из пациентов через несколько лет после операции стали возникать ощущения судорог и острой боли, хотя нога была ампутирована. Ощущения эти были настолько реальны, что он не мог от них отделаться, и хирурги решили подвергнуть воздействию импульсами ультразвука область зрительного бугра головного мозга. Во время этой операции пациент находился в сознании и его впечатления об ощущениях записывались на магнитофонную ленту. После первого импульса ультразвука пациент сообщил об уменьшении ощущения судорог в ноге. Последовавшие за первым шесть импульсов привели к последовательному снижению и исчезновению болевых ощущений.

Группа научных работников и инженеров под руководством профессора Воронежского сельскохозяйственного института В. Акатова после многих лет упорной творческой работы впервые в отечественной и мировой практике создала ветеринарный ультразвуковой терапевтический аппарат, предназначенный для лечения животных и проведения биологических исследований. Оригинальный аппарат портативен, имеет приспособление дозировки ультразвука, дистанционное управление и набор различных ультразвуковых головок.

НА СУШЕ И НА МОРЕ

22 сентября 1914 года три английских крейсера «Абукир», «Хог» и «Кресси» находились в дозоре в Северном море. Внезапно у борта одного из крейсеров раздался мощный взрыв, корабль начал тонуть. Два других поспешили к нему на помощь, но тут же одного из них постигла та же участь. Вскоре пошел ко дну и третий.

Все три крейсера стали легкой добычей небольшой немецкой подводной лодки. Погибло тогда более тысячи английских моряков.

После этого случая начались лихорадочные поиски средств борьбы с подводными лодками. Причем не столько средств борьбы (тогдашние подводные лодки были тихоходными, неповоротливыми и почти беспомощными в надводном положении), сколько средств своевременного их обнаружения. Вскоре такие средства были найдены — появились приборы, которые могли обнаружить подводный объект, производящий шум, и определить направление на него. Такие приборы получили название шумопеленгаторов.

Именно тогда начала развиваться и сама наука о прохождении звука в жидкой среде — гидроакустика. Конечно, было бы совершенно неверным представлять себе дело так, что все началось с нуля. Как распространяется звук в воде и каким закономерностям он при этом подчиняется — это изучали и раньше. Не дремала также и инженерная мысль. Так, например, еще в 1912 году русский инженер К. В. Шиловский изобрел прибор для предотвращения столкновений судов с айсбергами и массивными льдинами. Работа прибора основывалась на принципе подводной звуковой эхолокации, то есть приема отраженных от объекта эхо-сигналов.

Опытами К. В. Шиловского заинтересовалось французское военное ведомство. В Париже русский инженер приступил к широким исследованиям в области гидроакустики. Вскоре к этим исследованиям подключился французский физик Поль Ланжевен. Их творческое содружество — ученого и инженера — принесло свои плоды: в Средиземном море был испытан созданный ими прибор, способный обнаруживать подводную лодку на расстоянии двух километров. Это был первый в мире гидролокатор, прообраз и основа всех последующих поколений гидролокаторов, включая даже самые современные.

Поиск, атака, маневр — все действия и подводных лодок и надводных кораблей зависят теперь от показаний гидроакустических приборов, от четкой и грамотной работы гидроакустиков. Гидроакустик первым обнаруживает противника, по его данным командир корабля принимает решение. Можно даже сказать так: гидроакустик

начинает поединок с противником, который потом ведет весь личный состав корабля.

Ясно, конечно, что современные гидроакустические средства обнаружения подводных лодок (равно как и поиск целей подводными лодками) далеко ушли от своих прародителей. Они стали гораздо сложнее, работают они гораздо надежнее и точнее, хотя деление на шумопеленгаторные и гидролокационные сохранилось. Гидролокационные станции по методу поиска подразделяются на станции шагового поиска и станции кругового обзора. При шаговом поиске акустические волны излучаются направленно в виде узкого луча. При круговом поиске излучение ненаправленное, круговое, но прием отраженного эхо-сигнала направленный. Оба типа гидролокатора имеют свои преимущества и свои, естественно, недостатки, чем в известной мере определяется их использование. Так, по данным зарубежной печати, станции кругового обзора устанавливаются на кораблях противолодочной обороны и на подводных лодках. Дальность действия таких гидролокаторов, работающих в режиме эхопеленгования, превышает в несколько раз дальность действия других гидролокационных станций. Дальность действия гидролокаторов во многом зависит от гидрологических условий моря или океана, отражательной способности подводных целей, уровня собственных помех и технических параметров самой станции.

В зарубежной печати обсуждается вопрос о повышении дальности действия путем увеличения длины волны, то есть путем перехода от ультразвуковых частот к звуковым. Высказывалась также идея применения буксируемых гидролокаторов с переменной глубиной. У буксируемого гидролокатора акустическую антенну в специальном контейнере-обтекателе можно опускать на такую глубину, где условия распространения звуковых волн наиболее благоприятные. Гидролокатор переменной глубины имеет и ряд других преимуществ, в частности уменьшается влияние собственных помех, так как акустическая антенна удалена от источников шума, легче становится обслуживать и ремонтировать акустическую антенну.

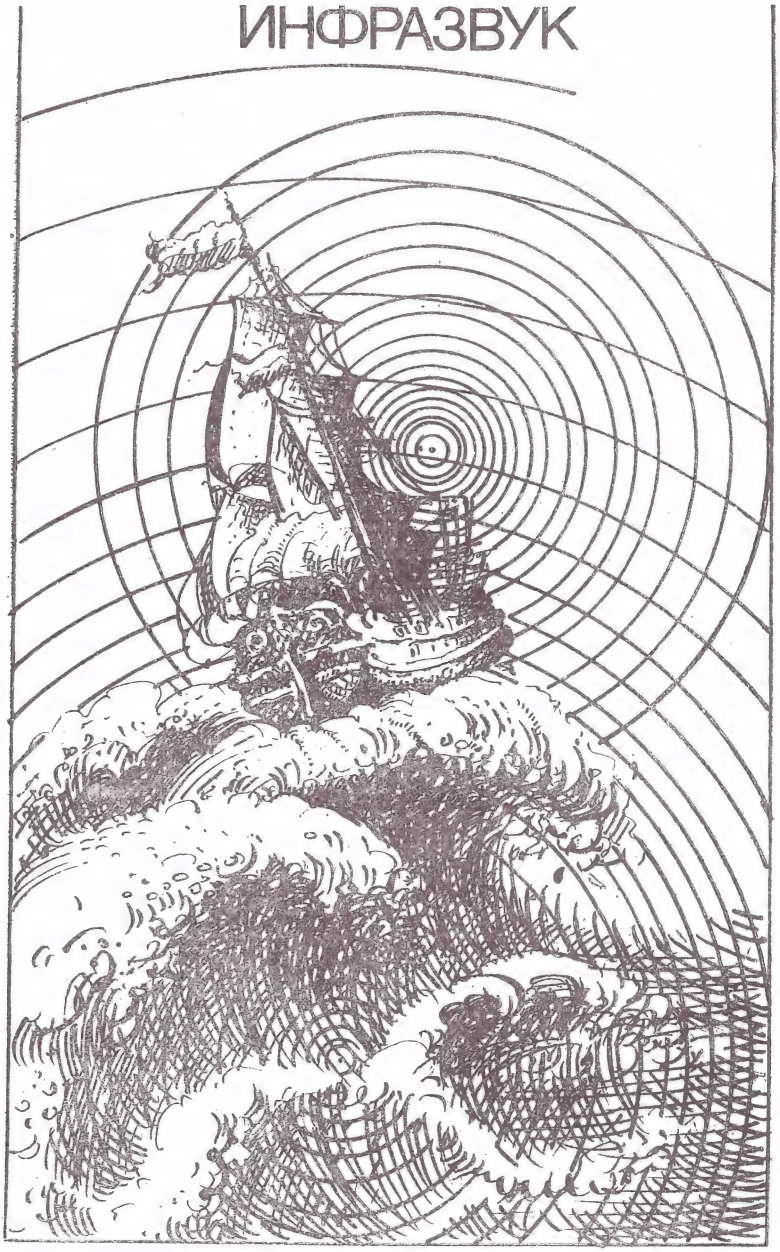
Совершенствование средств обнаружения подводных объектов продолжается.

Но «подводные объекты» — это не только подводные лодки или другие военные суда. Косяк рыбы для промысловиков — тоже подводный объект. В последние де-

сятилетия ведется интенсивное изучение океанов, морей, крупных внутренних водоемов вроде озера Байкал. В этих исследованиях звуковые и особенно ультразвуковые приборы просто незаменимы, в частности без них были бы невозможны крупномасштабные исследования донного рельефа морей и океанов. Гидролокаторы, эхолоты вкупе с другими техническими средствами «ви́дения на расстоянии» (например, радарами) обеспечивают безопасность судоходства. Разработана и широко применяется звукоподводная связь.

Словом, для ультразвука немало работы везде: и на суше, и на море. Он, как мы в том убедились, способен на многое. Именно поэтому область его применения все время расширяется, а создаваемые на его основе устройства, приборы и целые системы становятся все многообразнее. В сущности, рождается (а в ряде случаев уже родилась) ультразвуковая технология, сопоставимая с электронно-лучевыми, плазменными, импульсными, биологическими, радиационными, мембранными, химическими и иными принципиально новыми, прогрессивными технологиями, позволяющими, как сказано в Основных направлениях экономического и социального развития СССР на 1986—1990 годы и на период до 2000 года, «многократно повысить производительность труда, поднять эффективность использования ресурсов и снизить энерго- и материалоемкость производства». Посмотрим с этой точки зрения на такую, скажем, отрасль производства, как обработка металлов. Вот что по этому поводу в беседе с корреспондентом журнала «Наука и жизнь» сказал вице-президент АН СССР, академик К. В. Фролов: «Изменяя интенсивность и спектральный состав ультразвукового поля, можно преобразовать те внутренние структуры металлов, которые определяют их прочность и эластичность. Перспективность этого технологического направления безусловна, ибо теоретически достижимый предел прочности металлов, обработанных ультразвуком, почти в 100 раз превосходит предел их прочности в обычных условиях. Это значит, что даже в лучших образцах создаваемых сегодня конструкций используется лишь незначительная часть огромных ресурсов, которыми в принципе располагают металлы».

ИНФРАЗВУК



ЗВУКИ «ТИШИНЫ»

Инфразвуки — это звуки с частотой 16—20 герц и ниже. Казалось бы, это небольшой участок частотной шкалы. Однако колебания в границах этого участка могут быть равны одному герцу, десятой, сотой, тысячной, миллионной доле герца и т. д. Эта область звуковых частот лежит вне восприятия человеческим ухом.

В начале книги отмечалось, что инфразвуки изучены еще недостаточно. Вместе с тем даже то, что мы о них знаем, дает основание сделать вывод о большом научном и практическом значении звуковых колебаний такой частоты. Обращает внимание прежде всего тот факт, что звуковые волны этого частотного диапазона характеризуются высокой проникающей способностью: они распространяются на большие расстояния и почти при этом не ослабляются.

Инфразвуковые волны возникают в самых различных условиях: при обдувании ветром зданий, деревьев, телеграфных столбов, металлических ферм, при движении человека и животных, при работе различных механизмов и т. д. Иными словами, мы живем в мире инфразвуков, не подозревая об этом. Зарегистрировать их могут лишь специальные приборы.

Но не подозревая о существовании в мире инфразвуков, не слыша их, мы тем не менее можем от них пострадать или в лучшем случае испытать весьма неприятные ощущения.

Дело в том, что некоторые внутренние органы человека имеют собственные резонансные частоты колебаний 6—8 герц. При воздействии инфразвука этой частоты может возникнуть, естественно, резонанс и вызвать неприятные ощущения, а то и привести к тяжелым последствиям. Инфразвук даже небольшой мощности действует болезненно на уши, заставляет «колебаться» внутренние органы — человеку кажется, что внутри у него все вибрирует. По-видимому, именно инфразвуки являются основной причиной тяжелой и непроходящей усталости городских жителей и рабочих «шумных» предприятий.

В одном из старинных лондонских театров более полувека назад ставили пьесу, в середине которой действие переносилось из современности в глубокое прошлое. Как ни пытался постановщик создать впечатление таинствен-

ности по ходу действия, ничего у него не получалось. Знаменитый ученый физик Роберт Вуд, отличавшийся удивительной изобретательностью по части оригинальных физических опытов и экспериментов, находившийся на репетиции, предложил воздействовать на зрителей низкочастотным неслышимым звуком. На следующий день в театр привезли очень длинную и широкую трубу и пристроили ее к орга́ну. Незадолго до начала спектакля Вуд провел кратковременный опыт по влиянию инфразвука на людей. Когда он привел в действие генератор, ничего не подозревавших зрителей охватило странное беспокойство, беспричинный страх, они стали тоскливо переглядываться, смотреть по сторонам, а некоторые встали со стульев и пошли к выходу. Никакого звука не было, но хрустальные подвески старинного канделябра задрожали. Даже на улице началась паника.

Аналогичный случай произошел в лаборатории электроакустики Морского научно-исследовательского центра в Марселе, где ученые проводили опыты на различных частотах и мощностях излучения. При испытании одного из генераторов инфразвука исследователи вдруг почувствовали себя плохо. Все вибрировало у них внутри — желудок, сердце, легкие. В соседних лабораториях люди закричали от боли. Генератор выключили, но в течение еще нескольких часов они чувствовали себя совершенно «разбитыми». В той же лаборатории был создан инфразвуковой генератор, способный разрушить здание, хотя его мощность составляла всего 2 киловатта.

Разрушительная сила инфразвука проявляется тогда, когда частота инфразвуковых колебаний совпадает с собственной (резонансной) частотой предметов. Происходит примерно то же самое, что в известном из школьного курса физики случае, когда под шагавшими в ногу солдатами обрушился мост. Естественно поэтому, что работа с инфразвуком и его изучение представляют известную трудность.

Детальными исследованиями инфразвуков занялся французский ученый Гавро, причем не столько по влечению, сколько под влиянием случайной причины. Однажды Гавро и сотрудники его лаборатории внезапно подверглись воздействию очень интенсивных низкочастотных волн, которые вызвали у людей сильную боль в ушах. Приборы и установки в лаборатории буквально вибрировали, тогда как микрофоны не регистрировали ника-

кого звука. Через некоторое время источник всех несчастий был найден. Им оказался неисправный вентилятор соседнего с лабораторией предприятия, вращающийся с малой скоростью.

Сотрудники лаборатории начали изготовление источников инфразвука — инфразвуковых генераторов. По принципу работы генераторы напоминают орга́нную трубу или полицейский свисток. Некоторые из таких сооружений имели огромную мощность. В лаборатории Гавро был изготовлен генератор, который излучал волны, почти смертельные для человека. Через пять минут после начала работы этого генератора сами его создатели стали испытывать мучительные боли. Инфразвук интенсивностью 160 децибел непосредственно действовал на внутренние органы человека, и была реальная угроза, что он может привести к внутренним кровоизлияниям. Другой изготовленный здесь генератор хоть обладал значительно меньшей мощностью, тем не менее ее вполне хватило, чтобы на потолке и стенах помещения появились трещины. По подсчетам Гавро инфразвуковой источник с частотой 7 герц должен иметь диаметр около 7,5 метра. Мощность такого чудовища в 170 тысяч раз будет превосходить мощность полицейского свистка.

Приведенные случаи — особые, связанные с большими дозами инфразвукового излучения. А обычный эффект его слабого воздействия на человеческий организм проявляется в виде «морской болезни», тошноты, головокружения, усталости, неприятных ощущений, головной боли, иногда ослабления зрения.

Научные исследования показали, что инфразвук «присутствует» практически везде, но, безусловно, в разных дозах. Наиболее он ощутим, например, в тоннелях, где движутся поезда и автомобили, а также под мостами и эстакадами. Измерения позволили сделать вывод, что инфразвук усиливается в помещениях небольшого объема. Проще говоря, в квартире, например, он более ощутим, чем на улице.

Выяснилось, что большинство источников инфразвука создано самими же людьми. Легковой автомобиль на скорости 100 километров в час создает инфразвук интенсивностью более 100 децибел, а двухместный вертолет на скорости 120 километров в час — около 120 децибел. В моторном отделении 400-тонного парома зарегистри-

рованы инфразвуковые колебания на частоте 13 герц интенсивностью 113 децибел.

Инфразвук с известной долей условности можно уподобить нейтрино — элементарной частице, которая настолько слабо взаимодействует с веществом, что для нее земной шар — не преграда. Инфразвук таким свойством, конечно, не обладает, тем не менее и он проходит без значительного ослабления многие преграды, благодаря тому что у него очень велика длина волны. Причем тут любопытно вот что: инфразвуки легко «маскируются» слышимыми звуками — шумом. Чем более шумно вокруг нас, тем меньше «слышен» инфразвук.

Инфразвук любой частоты и интенсивности техногенного происхождения — это один из видов загрязнения окружающей среды, вредного для здоровья людей. К сожалению, нигде в мире нет пока научно установленных нормативов инфразвукового излучения, отступление от которых влечет за собой неблагоприятные воздействия на человеческий организм. Но исследования в этом направлении интенсивно ведутся на фоне изучения инфразвуков вообще. У нас в стране этим занимаются, например, в Научно-исследовательском институте строительной физики (НИИСФ), Московском научно-исследовательском институте гигиены имени Ф. Ф. Эрисмана и Московском государственном университете.

Ученые НИИСФа, используя специальную камеру, исследуют инфразвуки с разных сторон. Колебания, не представляющие опасности для организма, создаются электродинамическими преобразователями. Задача опытов — определить степень влияния низкочастотных колебаний на нервную, сердечно-сосудистую системы человека, на его работоспособность. Внимание и реакция определяются с помощью специальных тестов, таблиц и приборов. Установлено уже, что у половины проверяемых людей шум на частоте 2—15 герц интенсивностью 105 децибел в два раза замедляет зрительную реакцию, а при уровне шума 95 децибел на 10 процентов возрастают ошибки слежения за стрелочным индикатором. Замечено также судорожное подергивание глазного яблока и нарушение функции органов равновесия.

Характерно, что именно с такими инфразвуками мы часто сталкиваемся в повседневной жизни. Теперь понятно, почему многие автомобилисты жалуются на неприятные ощущения и даже страх, который они испы-

тывают при длительных поездках на автомобилях со скоростью, близкой к 100 километрам в час. Некоторые водители жалуются на головокружение, напоминающее легкое опьянение, затуманивание зрения, повышенную сонливость, слабость.

В настоящее время основная цель ученых — найти методы борьбы с инфразвуком, так как он, как уже было сказано, распространяется беспрепятственно на десятки тысяч километров и никакие строительные сооружения не могут этому помешать.

Чего же удалось достичь в борьбе с инфразвуком? Пока немногого. Сотрудники Ленинградского института железнодорожного транспорта создали своего рода глушитель инфразвукового шума для компрессоров и других машин. В НИИСФе ведется разработка специальных инфразвуковых изолирующих перегородок. Звукопоглотители низкочастотных колебаний разрабатываются и акустиками кафедры физики Московского государственного университета. Во Франции Гавро тоже занимается вопросами защиты от интенсивного инфразвука. Он предложил и в лабораторных условиях экспериментально опробовал систему клапанов для выпрямления низкочастотных звуковых волн.

Английские ученые с 1964 года занимаются изучением последствий воздействия на человека инфразвуков. Поводом к таким исследованиям послужило одно непредвиденное обстоятельство. Сотрудники конструкторского бюро, расположенного недалеко от полигона, на котором испытывались реактивные двигатели для самолета «Конкорд», постоянно чувствовали недомогание. Исследование показало, что во время испытаний двигателей в помещении наблюдался очень высокий уровень интенсивности инфразвука. Необычные симптомы, которые возникли у людей, были обусловлены сверхнизкочастотными компонентами звука, присутствовавшими в спектре шумов реактивного двигателя. Высокий уровень инфразвука может вызвать нарушение в статических и динамических органах равновесия тела, которые являются частью внутреннего уха. Есть предположение, что область собственных частот этих органов лежит именно в инфразвуковом диапазоне от 2 до 20 герц. Опросы людей, работающих на площадках для запуска ракет в США, подтвердили это предположение.

Английские ученые работали с инфразвуковыми генераторами частотой два герца и более мощностью 140 децибел. Обычными приборами такие звуки обнаружить нельзя, поэтому были изготовлены специальные наушники, представляющие собой два 15-ваттных микрофона диаметром около 30 сантиметров. Эксперименты, проведенные над сотрудниками лаборатории, и записи биотоков глазных мышц при судорожных подергиваниях, связанных обычно с потерей равновесия, подтвердили гипотезу о нарушении функций органов равновесия. Люди во всех подобных случаях испытывают одинаковые ощущения: легкую тошноту, ощущение вращения, непроизвольное вращение глазных яблок и, наконец, чувство какого-то неудобства. Все эти симптомы указывают на нарушение функций органов равновесия при облучении человека инфразвуковыми колебаниями в диапазоне частот 2—10 герц.

Ответные реакции организма изучались при двух режимах работы источника инфразвука: первый — при частоте 6 герц мощностью 142 децибела; второй — при частоте 2 герца мощностью 150 децибел. Анализ записей биотоков показал, что при втором режиме наблюдались более существенные нарушения функций органов равновесия. В этом случае люди испытывали острое чувство потери равновесия и сильное ощущение тошноты.

Впечатляющие результаты были получены американским ученым Данном. Он заметил, что летчики и космонавты, подвергнутые воздействию искусственно созданного инфразвука, медленнее решали простые арифметические задачи, нежели обычно. Существует предположение, что различные аномалии в состоянии людей при плохой погоде, объясняемые климатическими условиями, являются на самом деле следствием воздействия инфразвуковых волн. Много данных говорит о том, что некоторые животные могут служить надежными биопредвестниками землетрясений, поскольку зарождение очагов землетрясений сопровождается излучением волн необычайной длины, животные их чувствуют раньше, чем разразится само землетрясение. Некоторые ученые предполагают, что инфразвук оказывает сильное влияние на психику людей.

В Англии были проведены исследования, цель которых изучить влияние на человека инфразвука, возникающего при работе судовых двигателей. Уровень инфразву-

ка в данных экспериментах был несколько ниже, чем в лабораторных условиях. Однако в записи, проведенной в машинном отделении судна при уровне интенсивности 118 децибел и частоте 7 герц, наблюдался пик, связанный с такими явлениями, как головокружение, вялость и потеря равновесия.

Поиски источников интенсивного инфразвука проводились также в промышленности и на транспорте. Максимальный уровень инфразвука (134 децибела) был отмечен на частоте 13 герц. Его создавал двигатель катера мощностью 400 лошадиных сил при поступлении во всасывающее отверстие карбюратора потока воздуха. В промышленности инфразвук высокой интенсивности возникал вблизи работающих на полную мощность сталеплавильных печей на металлургических заводах (118 децибел при частоте 6 герц) и в автомобилях, движущихся со скоростью 100 километров в час. Замечено, что если на судах инфразвук создается за счет работы двигателя, то в автомобилях он обусловлен срывом встречного потока воздуха позади автомобиля, причем интенсивность инфразвука возрастает с уменьшением частоты.

Исследования нарушений функций внутренних органов человека, подвергающегося воздействию инфразвуковых колебаний, находятся еще в начальной стадии. Однако полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что инфразвук потенциально опасен для здоровья человека. Он способствует потере чувствительности органов равновесия тела, а это приводит к появлению боли в ушах, позвоночнике и повреждениям мозга. Вероятно, еще более пагубными следует считать психологические последствия, обусловленные инфразвуком, который постоянно присутствует в атмосфере, хотя внешне она кажется нам совершенно спокойной.

Изучать инфразвук невозможно без устройств, регистрирующих инфразвуковые волны. Так как длина волны инфразвука велика (например, при частоте 7 герц она равна 48,5 метра), то обычные микрофоны не регистрируют такие колебания. Поэтому для регистрации инфразвуков разработаны детекторы инфразвука, которые по устройству довольно сложные.

Исследования в области инфразвука начаты сравнительно недавно, поэтому тут много еще неясного. Даже то, что уже признано доказанным, требует дальнейшего,

более глубокого изучения. Какие новости принесет раздел акустики, занимающийся изучением инфразвуков, покажет будущее.

«ГОЛОС МОРЯ»

Инфразвуковые волны часто возникают в океанах и морях. Это явление изучал советский ученый В. В. Шулейкин. Он назвал их «голосом моря». В 30-х годах В. В. Шулейкин и В. А. Березкин проводили эксперименты с метеорологическими шарами-пилотами, заполненными водородом. Они обнаружили, что если к шару-пилоту прислонить ухо, возникает болезненное ощущение, вызываемое резонансными колебаниями оболочки шара на частотах 8—13 герц. На берегу, вдали от моря, шар-пилот не резонировал. В. В. Шулейкин предположил, что над морем шар-пилот резонирует под действием колебаний воздуха, вызванных движением ветра над гребнями и впадинами морских волн. В 1935 году ученый докладывал в Академии наук СССР о возможности нового метода предсказания штормов на море по инфразвуковым волнам.

Советский ученый Н. А. Андреев доказал, что инфразвук зарождается над поверхностью воды в результате вихреобразования за гребнями волн. Следовательно, инфразвуковые волны распространяются не только по воздуху, но и в воде. Так как скорость распространения звука в воде значительно больше, предупреждение о шторме можно получить раньше.

Изучению природы возникновения инфразвуковых волн в океанских просторах посвящены многие работы академика Л. М. Бреховских. Он установил, что в штормовых областях могут существовать системы океанских волн. Сталкиваясь друг с другом, они вызывают инфразвуковые волны, переходящие в атмосферу и в воду. В атмосфере волны распространяются на большие расстояния, причем весьма своеобразно: сначала излучение идет вверх, на высотах около 50 километров изменяет свое направление, а потом на расстоянии 200—300 километров от источника возвращается к поверхности Земли, отражается от нее и вновь уходит вверх. Есть предположение, что именно подобное явление стало причиной того, что мощный артиллерийский салют, произведенный

в Лондоне при коронации королевы Виктории в 1837 году, был услышан на материке в 200—300 километрах от Лондона, а на расстоянии 50—100 километров его не слышали. Правда, это явление может быть объяснено и по-другому. Воздух только в житейском представлении кажется средой однородной. В действительности дело обстоит совсем иначе — среда эта далеко не однородная. Распространяясь в ней, звук может натолкнуться на своеобразную «зону молчания», дальше нее будут слышны те звуки, которым удалось обойти ее (тут надо иметь в виду, что, говоря о звуке, мы подразумеваем звуковые волны).

Коллектив советских ученых под руководством Л. М. Бреховских на специальных кораблях провел большие океанографические исследования по широкой программе, включая вопросы распространения инфразвуковых волн. Их монография «Акустика океана» удостоена Государственной премии.

ЖИВЫЕ ПРЕДВЕСТНИКИ БЕДЫ

На море полный штиль. Нет ни малейших признаков ухудшения погоды. Ярко светит солнце, на небе ни облачка. Но почему же медузы и некоторые прибрежные рыбы уплывают подальше в открытое море? Потому, оказывается, что они каким-то образом узнают о надвигающемся шторме.

Каким-то образом многие животные «предчувствуют» землетрясения. Свидетельств об этом в литературе накоплено немало. Пожалуй, самое первое свидетельство относится к 328 году до нашей эры, когда подземные толчки разрушили греческий город Геликос.

Японцы, живущие в сейсмически опасной зоне, с большим доверием относятся к тем видам рыб, которым молва и наблюдения приписывают способность предсказывать землетрясения. Нередко таких рыб держат дома в аквариумах. Замечено, что такого рода предсказательными способностями природа наделила птиц и даже насекомых.

Необычное поведение живых существ перед катастрофическими событиями — штормами, цунами, землетрясениями — в литературе называется аномальным. Однако под этим общим названием скрывается разное проявле-

ние такого поведения — от выражения беспокойства, на которое, как правило, не обращают внимания, до поспешного бегства или перемены места обитания, как это делают медузы. Те, кто читал роман великого фантаста Жюля Верна «Дети капитана Гранта», помнят, конечно, эпизод, когда масса обезумевших животных своим бегством предупредила путешественников о подземной буре.

А сколько записано рассказов очевидцев о собаках, проявлявших будто бы прямо-таки «человеческую» самоотверженность, пытаясь отвести беду от своих хозяев! В частности, о вполне достоверных случаях рассказывали те, кто пережил страшное Ашхабадское землетрясение 1948 года.

Ученые, заинтересовавшиеся поведением животных перед землетрясением, установили, что предвестниками этого грозного события могут считаться около 70 видов.

Что же чувствуют животные? Как они узнают о надвигающейся опасности?

Полного, достоверного, не допускающего кривотолков ответа на этот вопрос еще нет. В качестве претендентов на роль физических факторов, способных вызвать у животных ответную реакцию, выступают: изменения напряженности электромагнитных полей, повышенное выделение газов из земных недр, заряжение статическим электричеством распыленных в воздухе (аэрозольных) частиц и еще кое-что другое, но уже менее достоверное. Однако к числу наиболее вероятных физических раздражителей исследователи относят инфразвуки, которые, как уже отмечалось, могут распространяться на большие расстояния. Общеизвестно, что мощные инфразвуковые волны, порожденные катастрофическим извержением вулкана Кракатау в 1883 году, несколько раз «обежали» земной шар.

Вполне возможно, что о приближении шторма медузам и другим морским обитателям сигнализирует тот самый «голос моря», о котором говорилось в предыдущем параграфе, то есть инфразвуки, порождаемые ветром и штормовыми волнами.

Выше было сказано также, что инфразвуки определенной частоты отрицательно воздействуют на человека либо на его отдельные органы. Если допустить, что в спектре «голосов моря» есть инфразвуки такой частоты, то становится понятным тогда, почему перед штормом

у людей, страдающих сердечно-сосудистыми заболеваниями, ухудшается самочувствие. А именно такие наблюдения были сделаны на побережье Черного моря.

ИНФРАЗВУК СЛУЖИТ ЧЕЛОВЕКУ

Изучение инфразвукового диапазона упругих колебаний продолжается. И по мере продвижения здесь науки вперед расширяется область практического применения этих колебаний.

Начнем наш обзор с приборов, созданных для регистрации «голосов моря» инфразвукового диапазона. Такими приборами (приемниками) оборудуются береговые станции, их можно встретить и на кораблях. Назначение у них везде одно и то же — своевременно предупредить о штормовой погоде.

Устройства, основанные на приеме инфразвуковых волн, предупреждают и о более грозной опасности — цунами.

Устройство для предсказания штормов и цунами состоит из набора резонаторов инфразвуковых частот и прибора фиксации отдельных колебательных составляющих. В Советском Союзе и за рубежом для штормового прогнозирования разработаны чувствительные инфразвуковые приемники звука в воде и воздухе. В Англии, например, с помощью подводных приемников удалось предсказать шторм, когда он был еще на расстоянии 3000 километров от берега.

В Московском университете на кафедре биофизики создан бионический аппарат для предупреждения о штормах и бурях. Инфразвуковые волны улавливаются рупором, затем после усиления в шаровом резонаторе колебания поступают на пьезоэлектрическую пластинку, где они преобразуются в переменное электрическое напряжение. Усиленные электрические сигналы подаются к чувствительному индикатору — микровольтметру. Рупор с резонатором устанавливается на палубе судна или на берегу, остальная аппаратура — в закрытом помещении. Рупор вращается в горизонтальной плоскости и с помощью обратной связи останавливается в направлении прихода наиболее мощных инфразвуковых волн. Прибор фиксирует сигналы о наступлении шторма за 15 часов,

то есть задолго до предсказаний самого чувствительного барометра.

Сильные подводные толчки возбуждают необычайно большой длины колебания океана. Длина волн цунами от гребня до гребня достигает сотен и даже тысяч километров. В глубоководных районах они распространяются со скоростью более тысячи километров в час и способны проделать огромный путь. Высота волн — от гребня до впадины — обычно не превышает одного метра. По мере приближения к берегу на мелководье скорость волн снижается, а энергия колебания остается прежней. Поэтому быстро возрастает высота — до 10, а иногда, в особенно изрезанных местах побережья, до 50 метров и более. Обрушиваясь на берег, такие волны сметают все на своем пути.

Для предупреждения подобных грозных явлений существует служба цунами. В 1964 году, когда на юге Аляски происходило сильное землетрясение, сахалинская служба цунами дважды объявляла для Курильских островов состояние тревоги. Первое предупреждение о возможном появлении гигантских морских волн было передано на остров через 10 минут, после того как Южно-Сахалинская сейсмическая станция зарегистрировала сильные подземные толчки и установила, что эпицентр землетрясения находится в районе Аляски. В настоящее время создаются автоматизированные системы по упреждающему определению возникновения цунами.

Однажды береговые посты Японии приняли сигнал из точки океана в трехстах километрах от Токио. Японские ученые снарядили в этот район экспедицию. Она прибыла туда, передала несколько сообщений и... пропала. Все поиски никаких результатов не дали. Оказывается, судно попало в район извергающегося подводного вулкана. Этот трагический случай подсказал еще одно практическое применение сверхдальнего распространения звука, с помощью которого можно предсказывать появление катастрофических волн цунами. Ведь извержение подводного вулкана или подводные землетрясения, порождающие цунами, одновременно рождают и мощную звуковую волну, которая движется со скоростью в десять раз большей, чем огромный вал воды.

На том же принципе регистрации упругих колебаний инфразвукового диапазона работают сейсмографы — приборы, чутко прислушивающиеся к тому, что происхо-

дит в недрах Земли. А чтобы их чувствительность была как можно выше, их располагают глубоко под землей, оберегают от колебаний, которые могли бы исказить картину «внутренней жизни» планеты.

Инструментальные наблюдения за тем, что происходит в недрах Земли, вносят весомый вклад в развитие относительно молодой науки сейсмологии, значение которой непрерывно возрастает и в теоретическом и в практическом плане, а практический план — это прежде всего разработка надежных методов прогнозирования землетрясений, наносящих огромный ущерб народам, живущим в так называемых сейсмических районах. Гибнут люди, уничтожаются плоды их труда.

Хорошо служат упругие колебания инфразвукового диапазона разведчикам недр — геологам, геофизикам, изучающим строение Земли.

Инженеры и технологи тоже пытаются использовать для своих нужд инфразвук. Так, например, уже создан инфразвуковой прибор, предназначенный для измерения количества жидких, сыпучих и кусковых материалов в машинах и аппаратах химической технологии в условиях невесомости, при волнении, вспенивании, кипении жидкости, то есть в тех случаях, когда применение других методов невозможно или нежелательно.

Миллионами тонн исчисляется ежегодная добыча строительного щебня. Сама технология его производства проста, однако большую трудность представляет промывка — очистка известняка от глины, песка и других посторонних примесей. Чем чище щебень, тем прочнее бетон. На помощь пришел инфразвук. В Малиновском карьере вместо корыта с лопастями установлена наклонная труба. Она собрана из коротких металлических бочкообразных секций. Волнообразные колебания рабочего органа устройства вызываются инфразвуком. Амплитуду колебания оператор устанавливает в зависимости от вида сырья. При этом частоту очистки можно довести до идеальной. Процесс промывки непрерывный. Производительность установки — сто кубометров щебня в час. Инфразвуковой агрегат можно столь же эффективно применять в металлургической, химической и других отраслях промышленности.

Сотрудники Ленинградского института инженеров железнодорожного транспорта создали оригинальную виброустановку для формовки изделий из металла, желе-

зобетона, цемента. Раньше жесткие условия работы резко снижали срок службы вибротехники. Поэтому встала задача по созданию принципиально новой схемы передачи колебаний. Это удалось сделать, применив инфразвук. Он увеличил вибрацию платформы в несколько раз. В отличие от давно применявшихся вибрационных устройств генератор колебаний теперь обособлен и может быть укрыт, что делает агрегат практически бесшумным.

А вот какое применение инфразвуку совсем недавно нашли музыканты. В симфоническом концерте, состоявшемся в конце 1978 года в Большом зале Ленинградской филармонии имени Д. Д. Шостаковича, впервые в истории симфонической музыки был использован музыкальный инструмент, излучающий инфразвук. Как уже упоминалось, человек не воспринимает звуки, частота которых ниже 20 герц. Тем не менее инфразвук воздействует на человека, вызывая своеобразные эмоциональные состояния. Именно это свойство инфразвука решил использовать композитор Б. Тищенко в своей 4-й симфонии.

Специально изготовленный необычный музыкальный инструмент назвали инфрагеном. Принципиально он устроен так же, как любой другой духовой инструмент. Но, для того чтобы получить столь низкий (11 герц) звук, была использована длинная, около восьми метров, труба, соединенная с поршнем. Четыре мощных аккорда симфонии, сопровождавшихся инфрагеном, оказали эмоциональное воздействие на слушателей, окрасив мелодию дополнительными оттенками. Любители симфонической музыки это особенно прочувствовали во второй части.

Безусловно, что дальнейшее изучение и исследование звуков инфразвукового диапазона будут открывать все новые и новые области их применения, способствуя техническому прогрессу в различных отраслях науки и техники.

КНИГИ О ЗВУКЕ, УЛЬТРАЗВУКЕ, ИНФРАЗВУКЕ

НАУЧНО-ПОПУЛЯРНАЯ ЛИТЕРАТУРА

Белькович В. М., Клейненбер С. Е., Яблоков А. В. Загадка океана. М., Молодая гвардия, 1965.

Брегг У. Мир света, мир звука. Пер. с англ. Под ред. И. В. Обреимова. М., Наука, 1967.

Вечко Ю. И. Мир ультразвука. Л., Знание, 1963.

Горский Н. Н. Тайны океана. М., Изд-во АН СССР, 1960.

Гриффин Д. Эхо в жизни людей и животных. Пер. с англ. М., Физматгиз, 1961.

Дубах Г., Табер Р. Сто вопросов об океане. Л., Гидрометеоиздат, 1972.

Клименко А. Н. Живая радиоэлектроника. М., Знание, 1968.

Клюкин И. И. Нептун оглушен. Л., Судостроение, 1967.

Кок К. Видимый звук. М., Мир, 1974.

Кудрявцев Б. Б. О неслышимых звуках. М., Воениздат, 1958.

Лямшев Л. М. Звук. М., Знание, 1961.

Морозов В. П. Занимательная биоакустика. М., Знание, 1983.

Мясников Л. Л. Неслышимый звук. Л., Судостроение, 1967.

Ощепков П. К., Меркулов А. П. Интроскопия М., Знание, 1967.

Протасов В. Р., Никольский И. Д. Голоса в мире безмолвия. М., Пищевая промышленность, 1969.

Псаломщиков В., Степанюк И. Безмолвные корабли.— Морской сборник, 1974, № 6.

Расторгуев Б. П. Окно в мир звука. М., Знание, 1978.

Розенберг Л. Д. Рассказ о неслышимом звуке. М., Изд-во АН СССР, 1961.

Томилин А. Г. В мире китов и дельфинов. М., Знание, 1980.

Томилин А. Г. Снова в воду. М., Знание, 1984.

Ческин М. С. Борьба с шумами. М., Знание, 1965.

Чедд Г. Звук. Пер. с англ. Под ред. С. Б. Гуревича. М., Мир, 1975.

Эврика. М., Молодая гвардия, 1984.

Эскин Г. И. Ультразвук шагнул в металлургию. М., Металлургия, 1975.

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ ЛИТЕРАТУРА

Абрамов О. В. Кристаллизация металлов в ультразвуковом поле, М., Металлургия, 1972.

Абрамов О. В., Хорбенко И. Г., Швегла Ш. Ультразвуковая обработка материалов. М., Машиностроение, 1984.

Агранат Б. А. и др. Ультразвук в гидрометаллургии. М., Металлургия, 1969.

Агранат Б. А., Башкиров В. И., Китайгород-

ский Ю. И. Ультразвуковая очистка.— В кн.: Физические основы ультразвуковой технологии. М., Наука, 1970.

Бергман Л. Ультразвук и его применение в науке и технике. М., Изд-во иностр. лит., 1967.

Бреховских Л. А. Акустика океана. М., Наука, 1974.

Вероман В. Ю., Аренков А. Б. Ультразвуковая обработка материалов (Библиотечка электротехнолога, вып. 4). Л., Машиностроение, 1971.

Волосатов В. А. Работа на ультразвуковых установках. М., Высшая школа, 1979.

Выборнов Б. И. Ультразвуковая дефектоскопия. М., Металлургия, 1974.

Келлер О. К., Кратыж Г. С., Лубляницкий Г. Д. Ультразвуковая очистка. Л., Машиностроение, 1977.

Марков А. И. Ультразвуковая обработка материалов (Библиотечка технолога). М., Машиностроение, 1980.

Мицкевич А. М. Ультразвуковая сварка металлов.— В кн.: Физические основы ультразвуковой технологии. М., Наука, 1970.

Мухарлямов Н. М., Беленков Ю. Н. Ультразвуковая диагностика в кардиологии. М., Медицина, 1981.

Попилов Л. Я. Справочник по электрическим и ультразвуковым методам обработки материалов. Л., Машиностроение, 1971.

Северденко В. П. и др. Ультразвук и прочность. Минск, Наука и техника, 1979.

Силин Л. Л., Баландин Г. Ф., Коган М. Г. Ультразвуковая сварка. М., Машиностроение, 1962.

Сперанский А. П., Рокитянский В. И. Ультразвук и его лечебное применение. М., Медицина, 1970.

Ультразвуковая технология. Под ред. Б. А. Аграната. М., Металлургия, 1974.

Физические основы ультразвуковой технологии. Под ред. Л. Д. Розенберга. М., Наука, 1970.

Холопов Ю. В. Ультразвуковая сварка М., Машиностроение, 1972.

Хорбенко И. Г. Ультразвук в машиностроении. М., Машиностроение, 1974.

Хорбенко И. Г. Ультразвук в военном деле. М., Воениздат, 1976.

Шрайбер Д. С. Ультразвуковая дефектоскопия. М., Металлургия, 1965.

Эскин Г. И. Ультразвуковая обработка расплавленного алюминия. М., Металлургия, 1965.

СОДЕРЖАНИЕ

От автора 3
Звук 7
Ультразвук 39
Инфразвук 175
Книги о звуке, ультразвуке, инфразвуке 190

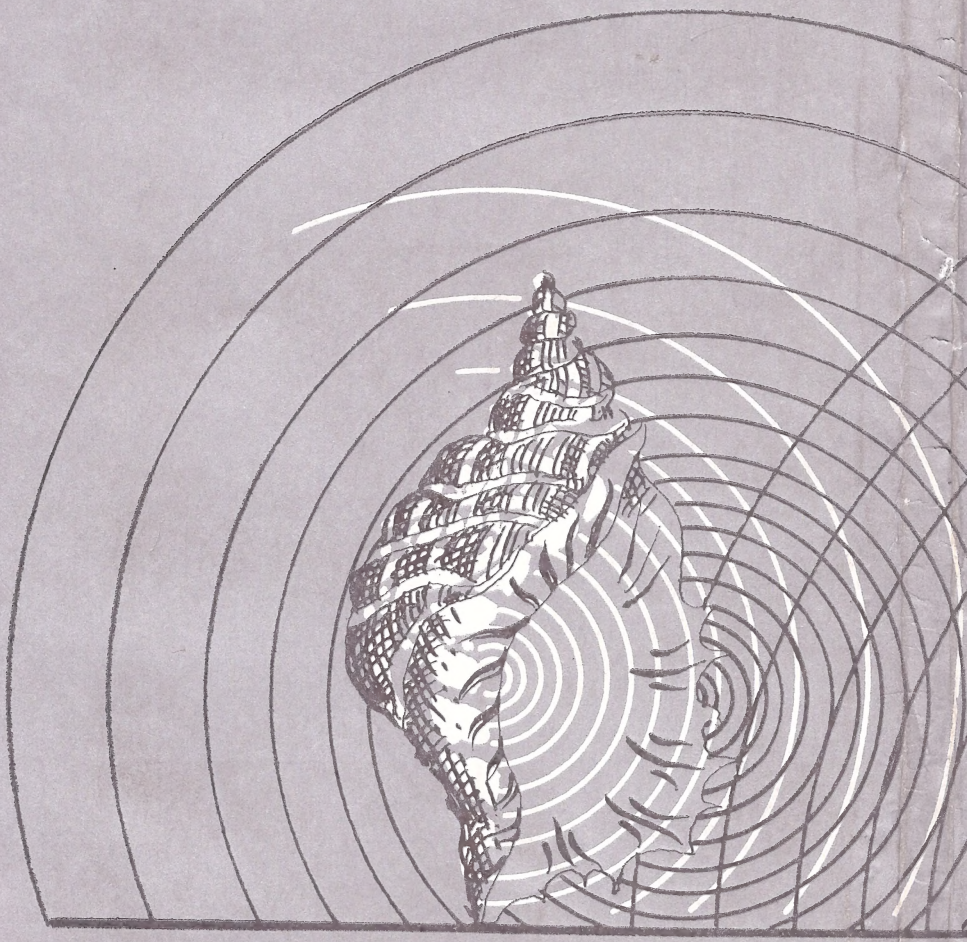
Иван Григорьевич ХОРБЕНКО

ЗВУК, УЛЬТРАЗВУК, ИНФРАЗВУК

Главный отраслевой редактор *В. П. Демьянов*
Редактор *Н. Ф. Яснопольский*
Мл. редактор *Н. А. Васильева*
Художник *М. А. Дорохов*
Худож. редактор *М. А. Гусева*
Техн. редактор *С. А. Птицына*
Корректор *С. П. Ткаченко*

ИБ № 7722

Сдано в набор 30.08.85. Подписано к печати 10.03.86. А 00984. Формат бумаги 84×108 1/32. Бумага тип. № 1. Гарнитура литературная. Печать высокая. Усл. печ. л. 10,08. Усл. кр.-отт. 10,29. Уч.-изд. л. 10,73. Тираж 85000 экз. Заказ 5—605. Цена 40 коп. Издательство «Знание». 101835, ГСП, Москва, Центр, проезд Серова, д. 4. Индекс заказа 867707.
Киевская книжная фабрика. 252054, Киев-54, ул. Воровского, 24.

40к.

ИЗДАТЕЛЬСТВО
"ЗНАНИЕ"
МОСКВА
1986